

**EVALUACIÓN DE MEZCLAS DE PROTEÍNAS CON HIDROCOLOIDES SOBRE LAS  
PROPIEDADES ESPUMANTES DE EMULSIONES DE ACEITE DE AGUACATE  
PERSEA AMERICANA**

**SERGIO ANDRES CABRERA NAVARRO**

**Trabajo de grado como requisito parcial para optar al título de  
Magister en Ciencias Agroalimentarias**

**Director**

**ANGELICA PIEDAD SANDOVAL ALDANA  
Doctora en Ingeniería de alimentos**

**Codirector**

**HERLEY FERNANDO CASANOVA YEPES  
Doctor en Química**

**UNIVERSIDAD DEL TOLIMA  
FACULTAD INGENIERIA AGRONOMICA  
MAESTRIA EN CIENCIAS AGROALIMENTARIAS  
IBAGUE - TOLIMA**

**2018**

**COMITÉ DE INVESTIGACIONES  
ACTA DE GRADO**

**Estudiante: Sergio Andrés Cabrera Navarro  
MSc en Ciencias Agroalimentarias**

**TÍTULO:** "Evaluación de mezclas de proteínas con hidrocoloides sobre las propiedades espumantes de emulsiones de aceite de Aguacate Persea americana.

**Fecha Sustentación:** 5 de marzo de 2018

**Directores:** Angélica Piedad Sandoval Aldana y Herley Fernando Casanova.

**Jurado No.1:** María Victoria Álvarez Henao

**Jurado No.2:** Diofanor Acevedo Correa

<b>Factores Evaluados</b>	<b>Jurado 1</b>	<b>Jurado 2</b>	<b>Definitiva</b>
Relevancia Científica (30%)	4,5	4,0	4,3
Complejidad y Profundidad (20%)	4,5	4,5	4,5
Calidad Estructural (10%)	3,8	4,4	4,1
Estilo y Presentación (10%)	3,6	4,2	3,9
Sustentación del trabajo (30%)	4,8	4,6	4,7
Definitiva	4,5	4,0	4,2



**Hernán Jair Andrade Castañeda  
Coordinador del Comité de Investigaciones**

## DEDICATORIA

Esta tesis es dedicada a DIOS.

Despreciado y desechado entre los hombres, varón de dolores, experimentado en quebranto; y como que escondimos de él el rostro, fue menospreciado, y no lo estimamos. Mas él herido fue por nuestras rebeliones, molido por nuestros pecados; el castigo de nuestra paz fue sobre él, y por su llaga fuimos nosotros curados.

*Isaías 53: 3-5*

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios. A mi abuelita Emperatriz por su cariño y pasión, a mi Madre y mi Padre. Agradecimientos a Angélica Piedad Sandoval Aldana de la Universidad del Tolima, al Departamento de Investigaciones de la Universidad del Tolima, Freddy Forero Longas de la Universidad de Antioquia, a Alain Caiga y Christian Boinon de Teclis-Francia por su soporte técnico, a mi amigo Luis Fernando Segura del SENA Regional Tolima en el Espinal, a mi amiga María Victoria Álvarez Henao de la Universidad La Sallista de Medellín-Antioquia, Herley Casanova de la Universidad de Antioquia, al personal de Corpoica Centro de Investigación Nataima, a mis amigos del laboratorio Andrés Pava, Alexander Tafur y mi amigo en la ciudad de Medellín Gonzalo Gómez, al personal de seguridad del SENA por acompañarme durante todas las jornadas.

## **CONTENIDO**

	<b>Pág.</b>
<b>1. JUSTIFICACIÓN</b>	<b>15</b>
<b>2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	<b>18</b>
<b>3. OBJETIVOS</b>	<b>21</b>
3.1 OBJETIVO GENERAL	21
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
<b>4. MARCO DE REFERENCIA</b>	<b>22</b>
4.1 MARCO TEÒRICO Y ANTECEDENTES	22
4.2 ESTADO DEL ARTE	26
4.2.1 Tensión interfacial, propiedades reológicas y espumantes en alimentos	26
4.2.2 Propiedades reológicas interfaciales y comportamiento viscoelástico de las espumas alimentarias.	32
<b>5. METODOLOGÍA</b>	<b>34</b>
5.1 MATERIALES	34
5.1.1 Aceite de Aguacate	34
5.1.2 Proteínas	34
5.1.3 Hidrocoloides	34
5.2 PREPARACIÓN DE DISOLUCIONES DE PROTEÍNA (ALBUMINA Y CASEINATO DE SODIO)	34
5.3 PREPARACIÓN DE EMULSIONES DE ACEITE DE AGUACATE A PARTIR DE ALBUMINA Y CASEINATO DE SODIO	36
5.4 MEZCLA DE PROTEÍNA CON HIDROCOLOIDES	37
5.5 DETERMINACIÓN DE LA TENSIÓN INTERFACIAL	38
5.6 DISPOSITIVO DE FORMACIÓN DE LA GOTA	39

<b>5.6.1</b> Determinación de la velocidad de difusión ( $K_{dif}$ ).	40
<b>5.7</b> DETERMINACIÓN DEL COMPORTAMIENTO VISCOELÁSTICO POR TENSÍOMETRIA OSCILATORIA	41
<b>5.8</b> PROPIEDADES ESPUMANTES	41
<b>5.9</b> DISEÑO EXPERIMENTAL	44
<b>6. RESULTADOS Y DISCUSIONES</b>	45
<b>6.1. ANÁLISIS DE TAMAÑO DE PARTÍCULA EN EMULSIONES DE ACEITE DE AGUACATE</b>	45
<b>6.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS EMULSIONES DE AGUACATE, ELABORADAS CON ALBUMINA Y CASEINATO DE SODIO</b>	49
<b>6.2.1</b> Análisis de la tensión interfacial/superficial de emulsiones de aceite de Aguacate, con Caseinato de sodio y Albumina sobre la interfaz aire-emulsión	49
<b>6.2.2</b> Análisis de la velocidad de difusión de emulsiones de aceite de aguacate con Caseinato de sodio y Albumina sobre la interfaz aire-emulsión	55
<b>6.2.3</b> Análisis de la formación de espuma de emulsiones de aceite de aguacate con Caseinato de sodio y Albumina	57
<b>6.2.4</b> Análisis de los ensayos viscoelásticos interfaciales en emulsiones de aceite de aguacate con Caseinato de sodio y Albumina	59
<b>6.2.5</b> Imágenes de las burbujas formadas por las emulsiones de aceite de Aguacate con Caseinato de sodio y Albumina	61
<b>6.2.6</b> Análisis de varianza de las tensiones interfaciales/superficiales y la estabilidad de la espuma en emulsiones de aceite de aguacate con Caseinato de sodio y Albumina	65
<b>6.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE EMULSIONES DE ACEITE DE AGUACATE, ELABORADAS CON PROTEÍNAS Y MEZCLAS DE HIDROCOLOIDES</b>	67
<b>6.3.1</b> Análisis de la tensión interfacial del aire con emulsiones de aceite de aguacate Caseinato de sodio, Albumina y mezclas de hidrocoloides	67
<b>6.3.2.</b> Análisis de la velocidad de difusión sobre la interfaz aire-emulsión	

de emulsiones de aceite de aguacate con proteínas y mezclas de hidrocoloides	68
<b>6.3.3</b> Análisis de la formación de espuma en emulsiones de aceite de aguacate con Caseinato de sodio, Albumina y Mezclas con hidrocoloides	70
<b>6.3.4</b> Análisis de los ensayos viscoelásticos interfaciales de emulsiones de aceite de aguacate con proteínas y mezclas de hidrocoloides	73
<b>6.3.5</b> Imágenes de las burbujas formadas por las emulsiones de aceite de Aguacate con mezcla de proteínas e hidrocoloides	74
<b>7. CONCLUSIONES</b>	<b>77</b>
<b>8. EXPECTATIVAS Y RECOMENDACIONES</b>	<b>78</b>
<b>REFERENCIAS</b>	<b>79</b>
<b>ANEXO</b>	<b>88</b>

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1.</b> Formación y estabilidad de la espuma	27
<b>Figura 2.</b> Etapas del proceso de adsorción dinámico de proteínas en la Interface	30
<b>Figura 3.</b> Aplicación del modelo cinético modificado por Ward y Tordai (1946) para el cálculo de la constante de velocidad de difusión de una proteína hacia la interfase aireagua.	32
<b>Figura 4.</b> Preparación de disoluciones de proteína (Albumina y Caseinato de Sodio) Peso, homogenización, y sonicación de disoluciones de proteína	36
<b>Figura 5.</b> Preparación emulsiones a partir de aceite de aguacate con Disoluciones de proteína	36
<b>Figura 6.</b> Tensiómetro de gota digital. Teclis	39
<b>Figura 7.</b> Ensayos en Tensiómetro de gota	41
<b>Figura 8.</b> Analizador de Espuma. Teclis	42
<b>Figura 9.</b> Ensayos en Analizador de espuma	44
<b>Figura 10.</b> Tamaño de partícula de aceite de aguacate en emulsiones con Caseinato de sodio.	48
<b>Figura 11.</b> Tensiones interfaciales del aire en emulsiones de aguacate con Caseinato de Sodio	51
<b>Figura 12.</b> Tensiones interfaciales/Superficiales del aire en emulsiones de aceite de aguacate con Albumina	54
<b>Figura 13.</b> Velocidad de difusión ( $K_{dif}$ ) de emulsiones de aceite de Aguacate sobre la interfaz aire-emulsión	55
<b>Figura 14.</b> Representación gráfica del cálculo de la velocidad de difusión	56
<b>Figura 15.</b> Formación de espuma en emulsiones elaboradas con diferentes concentraciones de Caseinato de Sodio (% p/v)	58
<b>Figura 16.</b> Formación de espuma en emulsiones elaboradas con diferentes concentraciones de Albumina (% p/v)	58



<b>Figura 17.</b> Propiedades viscoelástica de emulsiones de Aceite de Aguacates elaborados con Caseinato de Sodio (% p/v)	60
<b>Figura 18.</b> Propiedades viscoelástica de emulsiones de Aceite de Aguacate elaboradas con Albumina (% p/v)	61
<b>Figura 19.</b> Formación de burbujas a partir de emulsiones de Aceite de Aguacate con Caseinato de Sodio	62
<b>Figura 20.</b> Formación de burbujas a partir de emulsiones de Aceite de Aguacate con Albumina	64
<b>Figura 21.</b> Tensiones interfaciales con mezclas de proteínas e hidrocoloides	68
<b>Figura 22.</b> Velocidad de difusión ( $K_{dif}$ ) de mezclas de proteínas con hidrocoloides en emulsiones de Aceite de Aguacate	69
<b>Figura 23.</b> Formación de espuma en emulsiones elaboradas con diferentes concentraciones de proteína (% p/v) e hidrocoloides (% p/v)	72
<b>Figura 24.</b> Propiedades viscoelástica de emulsiones de Aceite de Aguacate elaboradas con Albumina (% p/v)	74
<b>Figura 25.</b> Formación de burbujas a partir de emulsiones de Aceite de Aguacate con Albumina	75

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Tensiones Superficiales/interfaciales de algunas sustancias de interés a temperatura ambiente en mN/m.	28
<b>Tabla 2.</b> Concentraciones de Proteína	35
<b>Tabla 3.</b> Variables Respuesta del Diseño Experimental	37
<b>Tabla 4.</b> Mezclas de Albumina (% p/v) con hidrocoloides (% p/v)	38
<b>Tabla 5.</b> Mezclas de Caseinato de Sodio (% p/v) con hidrocoloides (% p/v)	39
<b>Tabla 6.</b> Imágenes burbuja de aire en emulsiones de Aceite de aguacate con Caseinato de Sodio	45
<b>Tabla 7.</b> Imágenes burbuja de aire en emulsiones de Aceite de aguacate con Albumina	46
<b>Tabla 8.</b> Tamaño de partícula de aceite de aguacate en emulsiones a diferentes Concentraciones de Caseinato de sodio	47
<b>Tabla 9.</b> Tensiones superficiales y estabilidad de espuma en emulsiones de Aceite de aguacate con Caseinato de sodio	66
<b>Tabla 10.</b> Tensiones superficiales y estabilidad de espuma en emulsiones de Aceite de aguacate con Caseinato de sodio	66

## LISTA DE ANEXOS

<b>Anexo A.</b> Análisis de varianza para las emulsiones con diferentes Concentraciones de caseinato de sodio	89
<b>Anexo B.</b> Análisis de varianza para las emulsiones con diferentes Concentraciones de albumina	91
<b>Anexo C.</b> Análisis de varianza para las de albumina 1.8% con goma Arábica 0.4% y albumina 1.8% con goma xantan	93
<b>Anexo D.</b> Análisis de varianza para las 4.8% con goma arábica 0.4% y caseinato 4.8% con goma xantan.	95
<b>Anexo E.</b> Análisis de varianza para las tensiones superficiales de las emulsiones con diferentes concentraciones de Albumina	97
<b>Anexo F.</b> Análisis de varianza para las tensiones superficiales de las Emulsiones con diferentes concentraciones de Caseinato	98
<b>Anexo G.</b> Análisis de varianza para el módulo elástico $G'$ y viscoso $G''$ de las emulsiones con diferentes concentraciones de Albumina	99
<b>Anexo H.</b> Análisis de varianza para el módulo elástico $G'$ y viscoso $G''$ de las emulsiones con diferentes concentraciones de Caseinato	101
<b>Anexo I.</b> Análisis de varianza para la estabilidad de espuma de las emulsiones con diferentes concentraciones de Albumina.	103
<b>Anexo J.</b> Análisis de varianza para la estabilidad de espuma de las emulsiones con diferentes concentraciones de Caseinato de Sodio.	104
<b>Anexo K.</b> Análisis de varianza para la formación de espuma	105
<b>Anexo L.</b> Análisis de varianza para la formación de espuma de las emulsiones con diferentes concentraciones de Caseinato de Sodio	106
<b>Anexo M.</b> Tablas velocidades de difusión	107

## RESUMEN

La estabilización de cremas, emulsiones y espumas, representa un reto para la industria alimentaria, pues garantizaría reducir consumos de energía e insumos durante los procesos de transformación. Este trabajo de investigación busca generar estabilidad a una emulsión aireada (espuma) de aceite de aguacate en mezcla con proteínas y polisacáridos que actuaran como emulsificantes alrededor de la fase dispersa. Se emplearon Albúmina y Caseinato de sodio, junto con mezclas de hidrocoloides. Los resultados más importantes, demostraron que las emulsiones de aceite de aguacate elaboradas con Albumina, mostraron los valores más altos de estabilidad y formación de espuma al emplear una concentración de proteína del 2.6% (p/v) llegando a permanecer hasta por 36063.67 segundos con un máximo nivel de 243 ml, en tanto que al emplear Caseinato de Sodio al 5.6% (p/v), se obtuvo una permanencia de 800 segundos, esta diferencia podría explicarse en que la albumina posee mayor cantidad de puentes disulfuro, los cuales tienen afinidad plenamente hidrofóbica, promoviendo la difusión de la proteína hacia la interfaz aire-emulsión, haciendo que se dé mayor interacción y dinámica con el aire, en tanto que el Caseinato de Sodio, apenas tiene un puente disulfuro, mientras que la Albumina posee 17. Estos resultados también fueron soportados por las propiedades viscoelásticas de las espumas, encontrando que las espuma obtenida con Albumina, presentó mayores valores del módulo de almacenamiento  $G'$  sobre el de pérdida  $G''$ , es decir mantiene un comportamiento sólido elástico a diferencia de las espumas de Caseinato de Sodio, las cuales mostraron predominancia del módulo de pérdida  $G''$ , con tendencia hacia el líquido ideal de Newton. El estudio también identificó la potencialización en la funcionalidad del Caseinato de Sodio al incorporarse hidrocoloides en las emulsiones de aceite de aguacate, pues se observó incrementos en la estabilidad de la espuma, especialmente al mezclar la proteína con la Goma Xantan. Los análisis también demostraron una drástica disminución de la tensión superficial/interfacial, al emplear las proteínas junto con la adición de hidrocoloides, lo cual señala que estos componentes tensioactivos, actúan

eficientemente sobre la interfaz aire/emulsión. Al final micrografías de la estructura de la burbuja, fueron comparadas, mostrando que la albumina, muestra una conformación más sólida, mientras que al utilizar Caseinato de Sodio, se observa líquido al interior de la lamella.

**Palabras claves:** Proteínas, hidrocoloides, propiedades espumantes, aceite, *aguacate persea americana*

## ABSTRACT

The estabilization of creams, emulsions and foams represents a challenge for the food industry, it would guarantee to reduce energy consumption and inputs during the transformation processes. This research aims to generate an aerated emulsion (foam) stable of avocado oil mixed with proteins and polysaccharides, which act as emulsifiers around the dispersed phase. For the purposes of this research, albumin and Sodium Caseinate were used together with mixtures of hydrocolloids. The most important results showed that avocado oil emulsions made with albumin, showed the highest values of stability and foam formation when using a protein concentration of 2.6% (w / v) reaching up to 36063.67 seconds with a maximum level of 243 ml, whereas using Sodium Caseinate at 5.6% (w / v), a value of about 800 seconds was obtained, this difference was due to the fact that albumin has a greater amount of disulphide bridges, which they have a fully hydrophobic affinity, promoting the diffusion of the protein towards the air-emulsion interface, causing greater interaction and dynamics with the air, while the Sodium Caseinate, has a disulfide bridge, whereas Albumin has 17. These results were also supported by the viscoelastic properties of the foams, finding that the foam obtained with Albumin, showed higher values of the storage module  $G'$ , even over the loss  $G''$ , for that reason, it maintains a solid elastic behavior unlike the caseinate foams of Sodium, which showed predominance of the loss modulus  $G''$ , with a tendency towards the ideal liquid of Newton. The study also identified the potentiation in the functionality of sodium caseinate when hydrocolloids were incorporated in avocado oil emulsions, as increases in foam stability were observed, especially when mixing the protein with Xantan gum. The analyzes also showed a drastic decrease in surface / interfacial tension, by using the proteins together with the addition of hydrocolloids, which indicates that these surfactants components act efficiently on the air/emulsion interface. In the end, micrographs of the bubble structure were compared, showing that the albumin shows a more solid conformation, whereas when using Sodium Caseinate, liquid is observed inside the lamella.

**Keywords:** Proteins, hydrocolloids, foaming properties, oil, avocado, persea americana

## 1. JUSTIFICACIÓN

El aceite de aguacate es reconocido, por su composición de ácidos grasos, además que cumple con la totalidad de requerimientos nutricionales que se enfocan en reducir la cantidad de grasa saturada en la dieta, pues contiene una baja proporción de ácidos grasos saturados (Pérez Rosales, Villanueva Rodríguez, y Cosío Ramírez, 2005). Una de las razones del creciente interés mundial por el consumo de alimentos saludables, es el incremento en la tasa de obesidad que actualmente se presenta en las personas de países desarrollados, encontrando que esta afección está ligada a problemas de control de la saciedad (Vander Wal, Marth, Khosla, Jen, y Dhurandhar, 2005). La obesidad entre los adultos mayores ha alcanzado en el mundo una tasa 13%, hecho que preocupa a gobiernos y especialistas de las tecnologías de los alimentos (Organization, 2000). Existe una nueva tendencia para el control de la saciedad mediante el atrapamiento de altas cantidades de gas en forma de fase dispersa (i.e. espumas) en las matrices alimenticias, lo cual además reduce la densidad calórica (Aguilera, 2005), siendo las espumas una alternativa promisorio pues incorporan factores cognitivos (de Graaf, 2012) que promueven la estimulación visual al inhibir considerablemente el deseo de continuar ingiriendo alimentos (Hoad *et al.*, 2004).

Recientes publicaciones han resaltado el vínculo entre los hidrocoloides con propiedades de gelificación y la generación de saciedad. (Hunter, Pugh, Franks, y Jameson, 2008; Knarr, Adden, Anderson, y Hübner-Keese, 2012). En la actualidad, los nuevos alimentos aireados son percibidos como livianos en términos de calorías, por tanto satisfacen las necesidades de los clientes. Sin embargo, introducir gas en la matriz de un alimento afecta todas las características sensoriales como lo son textura, firmeza, apariencia, color y sabor en boca del alimento (Campbell y Mougeot, 1999). Adicionalmente los productos aireados pueden proveer una sensación de llenura en comparación a los alimentos no aireados, pues existen evidencias de que la ingesta de alimentos está influenciada tanto por el peso como el volumen, reportándose que incrementar el



contenido de aire puede llegar a hacer una estrategia efectiva para reducir la ingesta de energía (Osterholt, Roe, y Rolls, 2007).

El aire es un componente que incluso se encuentra en alimentos de forma natural en su fase dispersa en forma de burbujas o poros dentro de una matriz, estos incluyen a las frutas y las hortalizas las cuales contienen una cantidad apreciable de aire inmovilizado dentro de las células (Lazarides, Fito, Chiralt, Gekas, y Lenart, 1999). Las burbujas de aire son abundantes elementos estructurales en alimentos sólidos como pan, tortas, barras de chocolate aireado y merengue, en semi-sólidos incluye espumas tales como: crema batida, helados y en bebidas como gaseosas (Aguilera y Baffico, 1987).

Datos sobre las innovaciones más recientes en el mercado de los alimentos en Latinoamérica, han reportado que el consumo de bebidas preparadas a base de café, leche, postres o productos con crema batida, tienen una intención de compra por lo menos del doble y en algunos casos hasta 5 o 6 veces más, adicionalmente el estudio arrojó que el consumidor llegaría a pagar más si el alimento incluye crema batida, lo cual hace evidente que este componente alimentario es de alto valor entre las personas y además posee un mayor uso de lo habitual. De acuerdo con las cifras del estudio, fue identificado que del total de postres que se comercializan, el 56% vienen acompañados de crema batida, en su orden le sigue el café tipo frappe con 54% y malteada con un 26% (Gutiérrez Jiménez, 2015).

El caso específico del mercado de las cremas batidas en Colombia se concentra en los sectores de pastelería, panadería y restaurantes, donde actualmente la marca líder es Rich, además de Hanna's de Estados Unidos. El mercado de cremas refrigeradas en Colombia está compuesto por cinco empresas que importan este producto de países como Estados Unidos y Argentina. De acuerdo a la base de datos del Ministerio de Industria y Turismo (Cristancho Sosa, 2017), la marca con mayor participación en el mercado Colombiano es Rich's de los Estados Unidos, distribuidas por Acegrasas y Calsa de Colombia, esta crema es considerada la número uno en el país con una

participación del 89%; en el segundo puesto se encuentra Flavor Right del grupo americano Instant Whip Foods, distribuido por productos alimenticios Santillana, la cual tiene una participación del 9.5% en el país. Por último se encuentra la marca estadounidense Hanna's y Ledevit de Argentina con una cobertura de 1.4% y 0.7% respectivamente. Este prometedor mercado se encuentra en expansión siendo su principal punto de concentración en ventas y distribución la ciudad de Bogotá, logrando generar utilidades por más de \$1.215 millones de pesos.

La crema es una emulsión de glóbulos grasos cristalizados en una fase acuosa, el cual es estabilizado por proteína de suero dispuesta sobre la superficie de las gotas de grasa. Cuando la emulsión es agitada, el aire es introducido y produce una crema batida que eventualmente se transforma en espuma, que igualmente es estabilizada por las proteínas del suero, los cuales se arreglan sobre la superficie de la burbuja (Cristancho, 2009).

Por lo anterior es posible pensar en generar una espuma estabilizada a partir de aceite de aguacate, derivado de la producción industrial y de interés mundial por su composición en ácidos grasos insaturados, generando una nueva aplicación a esta materia prima, sin embargo se requieren estudios de estabilidad y aplicación de diversos surfactantes, lo que permitirá un desarrollo de producto con posible aplicación en el sector culinario.

## 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La gran mayoría de cremas no-lácteas son elaboradas a partir de aceite de palma hidrogenada, debido a su estabilidad a las altas temperaturas (Arbolea, Ridout, y Wilde, 2009). Sin embargo al someterse a temperaturas altas, la emulsión tiende a desestabilizarse (Nesaretnam, Robertson, Basiron, y Macphie, 1993). El aceite de palma es comúnmente usado en la industria de alimentos, ya que ofrece diferentes texturas, estructuras y sabores, no obstante las emulsiones que son generadas a partir de este aceite, requieren altas temperaturas para que la grasa pase a estado líquido, lo que permite una forma de emulsificación eficiente y que además es muy empleada por la industria de los helados, pues inmediatamente después la emulsión es enfriada haciendo que la grasa retorne a su estado sólido, hecho que es natural dado que su punto de fusión es de 40°C (Arbolea *et al.*, 2009). Estudios realizados por (Tiina, Tiina, & Kimmo, 2012) han determinado que algunas grasas vegetales utilizadas para la elaboración de cremas alimentarias, contienen altos porcentajes de grasas saturadas, mientras que la proporción de ácidos grasos polinsaturados puede ser muy bajas, siendo el caso del aceite de palma que alcanza niveles de grasas saturadas igual a 49,3%. Adicionalmente, los procesos de hidrogenización y desodorización empleados en la industria de las grasas generan ácidos grasos *trans* que son altamente nocivos para la salud humana.

De acuerdo con las normas internacionales establecidas para el control nutricional, se ha considerado que se debe ingerir menos ácidos grasos saturados y más poli-insaturados, recomendándose una ingesta de máximo 1 g de grasa saturada, para evitar de esta forma que se generen enfermedades cardiovasculares (BerGer, 2007; Cabezas-Zábala, Hernández-Torres, y Vargas-Zárate, 2016). El aceite de aguacate, por su composición de ácidos grasos, cumple con las recomendaciones nutricionales que se enfocan en reducir la cantidad de grasa saturada en la dieta. Se caracteriza por contener una baja proporción de ácidos grasos saturados que va desde 10% a 19% (Ratovohery, Lozano, y Gaydou, 1988) lo cual depende de su variedad y estado de madurez (Rosales,

Rodríguez, y Ramírez, 2005), también posee una elevada cantidad de ácidos grasos mono-insaturados que pueden llegar hasta un 80% expresados en ácido oleico, y está en una posición intermedia entre los aceites vegetales en cuanto al contenido de los ácidos grasos poli-insaturados (10-15%) encontrando principalmente ácidos omegas 3 y 6, siendo estos niveles comparables con lo encontrado en el aceite de oliva y de palma. En este orden de ideas, es importante considerar los efectos del aceite sobre la estabilidad de los sistemas, tal como lo describe (Arbolea *et al.*, 2009) quien ha demostrado, que el incremento en los ácidos grasos insaturados, particularmente el del ácido oleico, logran producir una espuma más estable en forma de crema batida.

Los fenómenos de absorción competitiva en la interface, que incluyen la presencia de diferentes sustancias activas, pueden ser importantes en la funcionalidad de la emulsión aireada. A menudo los nuevos productos alimenticios, son mezclas o complejas emulsiones alimentarias, a las cuales le son adicionados diversos ingredientes (especies, vegetales) con el fin de incrementar y generar un valor adicional, de hecho los recientes hábitos nutricionales de los consumidores ha promovido la preferencia por aderezos, salsas y mayonesas, factor que ha aumentado significativamente la producción de este tipo de productos en la industria de los alimentos (Mandala, Savvas, y Kostaropoulos, 2004). Productos como los aderezos, que pertenecen a las emulsiones O/W (aceite en agua) varían en su composición respecto al aceite, la cual puede modificar según el tipo de producto (Ford, Borwankar, y Martin Jr, 1997). Igualmente, los componentes que conforman las emulsiones alimentarias, junto con los procesos involucrados durante su transformación, permiten que aparezcan ciertas limitaciones en cuanto a estabilidad del producto, lo cual está definido por el pH, concentración de sal, calentamiento, deshidratación, refrigeración y congelamiento (Guzey y McClements, 2006). De igual forma, aparecen problemas debido a la interacción de dos o más biopolímeros de la mezcla (Dickinson y Stainsby, 1988).

Las burbujas son elementos deseables en la industria de alimentos y en las creaciones gastronómicas. Los mousses y las cremas chantillí son ejemplos clásicos en la cual la

incorporación y retención de burbujas es un factor crítico para el éxito del plato. Cuando se incorporan burbujas como fase dispersa en un alimento resulta importante considerar la estabilidad de las fases que se encuentran espacialmente distribuidas en la matriz, ya que estos alimentos son termodinámicamente inestables. A lo anterior se suma el hecho de que el control del tamaño y la distribución de las burbujas, se ha convertido en el mayor reto para la industria de los alimentos procesados. Existen diversas razones para considerar deseable disminuir el tamaño de las burbujas en los alimentos al igual que controlar su forma y su distribución de tamaño : modificar la textura, extender el rango de las propiedades físico-químicas, incrementar el área interfacial , disminuir la sinéresis y aumentar la perceptibilidad de los aromas (Buckman y Viney, 2002).

No obstante, el control de la estabilidad, el tamaño de la burbuja y la distribución del tamaño son el mayor reto aún no alcanzado por la industria de los alimentos (Zúñiga y Aguilera, 2008), a ello se suma la aparición del fenómeno de la alta polidispersidad de las burbujas que se genera al combinar componentes de distintos orígenes, convirtiéndose en un factor que multiplica la dificultad para alcanzar la estabilidad del producto. Por lo anterior se requieren realizar estudios específicos sobre las propiedades reológicas y la estabilidad de una espuma formada a partir de aceite de aguacate en mezclas con surfactantes que permita la generación de un producto con posible aplicación en la industria culinaria.

### 3. OBJETIVOS

#### 3.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar el efecto de mezclas de proteínas con hidrocoloides sobre las propiedades espumantes de una emulsión de aceite de aguacate *Persea americana*.

#### 3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar la tensión interfacial frente al tiempo al aplicar mezclas de proteínas con hidrocoloides sobre la interface Aire/emulsión de aceite de aguacate.
- Evaluar las propiedades reológicas interfaciales en el módulo elástico  $G'$  (almacenamiento) y el módulo de  $G''$  (pérdida) en mezclas de proteínas con hidrocoloides sobre el sistema aire/emulsión de aceite de aguacate.
- Determinar el efecto de las mezclas de proteínas con hidrocoloides sobre la estabilidad de la espuma conformada por el sistema aire/emulsión de aceite de aguacate.

## **4. MARCO DE REFERENCIA**

### **4.1 MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES**

El aceite no es el único componente que conforma las dispersiones alimentarias, el aire también es a menudo empleado en los alimentos como fase dispersa en forma de burbujas. Entre los alimentos que las contienen, se encuentran la crema batida, mousses, sorbetes de crema, crema de helados, o crema chantillí. Cabe resaltar que los alimentos líquidos aireados, son termodinámicamente inestables, para que exista la dispersión coloidal, las burbujas deben estar estabilizadas en la interface por moléculas superficialmente activas como los emulsificantes, las proteínas y algunos polisacáridos, de lo contrario la aparición de drenaje y coalescencia de las burbujas será eminente ya que no hay el suficiente incremento de la viscosidad en la lamela (Aguilera y Lillford, 2007). Lo anterior se traducirá en productos de baja estabilidad, mala apariencia y de poca calidad, pues si no se mantiene la retención de burbujas, el éxito de un prototipo en términos comerciales se pondrá en duda. Generar dispersiones alimentarias con una adecuada estructura y estabilidad termodinámica, se ha convertido en el reto más representativo de la industria de los alimentos (Adhikari, Howes, Bhandari, y Langrish, 2009).

Los emulsificantes permiten la formación y estabilización de gotas de aceite y los espumantes la generación de burbujas de aire, además poseen la propiedad de prevenir la agregación bajo diferentes condiciones de estrés, tales como pH, esfuerzo iónico, calentamiento y congelación. Adicionalmente, los agentes emulsificantes y espumantes difieren en costos, disponibilidad, facilidad de uso y compatibilidad frente a otros ingredientes, por esta razón no existe un solo surfactante para el uso en diferentes tipos de alimentos (Guzey y McClements, 2006), convirtiéndose en la oportunidad de desarrollar una amplia variedad de dispersiones alimentarias de diferentes texturas y

estables ante la acción de los agentes emulsionantes y espumantes(Adhikari *et al.*, 2009).

La absorción de los surfactantes promueve la disminución de la tensión interfacial y adopta una conformación estructural que confiere estabilidad coloidal al sistema. La mayoría de los polisacáridos de alto peso molecular, son hidrofílicos y no tienen mucha tendencia a absorberse en la interface agua-aire, pero pueden mejorar fuertemente la estabilidad de la espuma de proteína actuando como agente gelante(Dickinson, 2003). Algunos surfactantes como el Tween 20son usados como agentes espumantes en la industria de los alimentos (margarinas, grasas esparcibles, productos de panadería, cremas espuma) (Krog, Larsson, y Friberg; Norn, 2014), mientras que los lípidos solubles en aceite, tales como los mono y diglicéridos o fosfolípidos son usados para la estabilización de emulsiones alimentarias tipo W/O (agua-en-aceite)(Bazmi, Duquenoy, y Relkin, 2007; Goff, 1997).

La absorción de agentes emulsificantes en la interface juega un rol importante en la formación y estabilización de espumas y emulsiones. El fenómeno de relajación intermolecular de la monocapa es de gran importancia para la estabilidad de las dispersiones alimenticias, pues allí se permiten las asociaciones intermoleculares que conllevarán a la alteración de las propiedades de la superficie ocasionando eventualmente cambios reológicos. En resumen, la formación, estabilidad, y propiedades mecánicas de las dispersiones alimentarias dependerán de las características físico-químicas interfaciales de los emulsionantes alimentarios(Murphy, Farkas, y Jones, 2016).Una de las estrategias para crear dispersiones alimentarias más estables, ha sido la creación de complejos proteína-polisacárido covalentes que tienen buena actividad superficial y proporcionan una mejor protección contra el estrés ambiental. El fragmento de proteína anfifílica ancla los complejos a la interface, mientras que el fragmento de polisacárido hidrófilo sobresale en la fase acuosa y proporciona estabilidad frente a la agregación mediante la generación de una repulsión estérica de largo alcance(Kulmyrzaev, Sivestre, y McClements, 2000).



Por otra parte, la absorción de los surfactantes tiene un papel importante sobre la capacidad de formación de espuma, esto depende en gran medida de la concentración de la solución del surfactante y la migración de hemi-micelas hacia la interface. Una de las aplicaciones de los sistemas dispersos con las condiciones mencionadas anteriormente, han sido las cremas batidas, sin embargo estas espumas traen un gran problema de inestabilidad. Diferentes estudios sobre su estabilidad han mostrado que la adición de un solo surfactante tales como las gomas o las proteínas no permite estabilizar la espuma. La solución a este problema puede ser encontrar un sinergismo de los diferentes surfactantes e hidrocoloides, como ha sido logrado en la estabilización de otros alimentos como las cremas de helados (Leser y Michel, 1999).

Una medida a tener en cuenta, cuando se emplean surfactantes, son los valores del módulo dilatacional ( $E$ ), son definidos como el cambio en la tensión superficial inducidos por pequeñas deformaciones en el área superficial, estos parámetros proveen información significativa sobre las interacciones entre las moléculas absorbidas en la interface de la emulsión O/W (Dickinson, 2009). El comportamiento interfacial de una suspensión acuosa de goma arábica, fue estudiado evaluando sus propiedades a concentraciones de 2 y 5% p/v, para ello se empleó como fase dispersa aceite de pescado. Este estudio logró determinar la tensión interfacial aceite/agua inicial de 24 mN/m en ausencia de goma. (Vasile, Martinez, Ruiz-Henestrosa, Judis, y Mazzobre, 2016). Los resultados obtenidos del trabajo mostraron que los emulsificantes macromoleculares hidrofílicos son absorbidos en la interface, afectando las mediciones de la tensión interfacial. Las propiedades dilatacionales interfaciales fueron determinadas a través de ensayos de gota pendiente oscilatoria, ya que estas permiten prever la estabilidad coloidal del sistema O/W, lo que demostró que el módulo dilatacional ( $E$ ) se ve afectado al incorporar diferentes concentraciones de gomas sobre la capa absorbida de la interface O/W, así como el incremento gradual en la elasticidad está asociado con la adsorción de las moléculas surfactantes activas sobre la interface.

Recientes investigaciones en biopolímeros, han encontrado que las proteínas y las gomas exudadas presentan propiedades funcionales capaces de ser usadas como estabilizantes y emulsificantes en la industria de los alimentos (Dickinson, 2003). La influencia de los microgeles de lactoglobulina fue estudiada sobre la interface heptano/agua, para ello se realizó la variación sinusoidal en la superficie de la gota, inducida por medio una bomba piezo eléctrica, encontrando que al aplicar bajas concentraciones ( $< 0.005\%$ ), se producen cambios mínimos en la presión superficial de la gota de heptano, lo cual es atribuido a la absorción de pequeñas cantidades de microgeles, similarmente se apreciaron cambios en el módulo elástico dilatacional, luego de que se emplearan soluciones con distintos valores de pH a 5.7 - 5.9 (Dickinson, 2003)

Estudiar el comportamiento viscoelástico interfacial, resulta necesario para reconocer la estabilidad de una emulsión (Radulova, Danov, Kralchevsky, Petkov, y Stoyanov, 2014), últimamente se han realizado avances sobre la comprensión de la estructura mecánica con la que actúan las proteínas en la interface, para ello los ensayos de tensiometría oscilatoria, han permitido predecir la estabilidad de las dispersiones luego de que se presenten fenómenos de repulsión electrostática y estérica. (Humblet-Hua, van der Linden, y Sagis, 2013). La absorción de la proteína sobre la interface inicia con la difusión que en un momento es imperceptible y no se generan cambios en la tensión interfacial, posteriormente se forma una monocapa de proteína que eventualmente induce a la deformación estructural, la reducción de la tensión interfacial y al rápido incremento de la viscosidad, de esta forma se ha concluido que el proceso de absorción de la proteína puede ser bien descrito por las variaciones viscoelástico  $G'$  y  $G''$ .

Las medidas reológicas interfaciales de péptidos de soya/azúcar sobre la interface O/W, fueron analizadas en el módulo dilatacional interfacial, al tomar medidas de la adsorción en la oscilación sinusoidal. Los análisis encontraron que los péptidos de soya disminuyeron la tensión 10% de la condición inicial, fracturando la capa interfacial, hecho que indica que la capa interfacial de los péptidos de soya podrían resistir largas

deformaciones estructurales sin fracturas (Li, Zhao, *et al.*, 2016). Medidas reológicas de diferentes proteínas sobre la interface O/W, fueron obtenidas a una frecuencia angular de  $1 \text{ rad/s}^{-1}$ , las propiedades viscoelásticas del Caseinato de sodio no presentaron cambios durante el tiempo de oscilación al emplear aceite de soya como fase dispersa, lo cual indica que se alcanzó un equilibrio, sin embargo los valores de  $G'$  y  $G''$  fueron en orden de magnitud más pequeños que al emplear aislado de proteína de soya (SPI), adicionalmente el módulo de pérdida fue mayor que el de almacenamiento, predominando sobre la capa de absorción, esto responde a que la capa interfacial es fluida y por tanto fuertemente viscoelástica. Mientras que al estudiar SPI, B-conglicina y glicina reducida, se encontró un rápido incremento en el módulo  $G'$ , lo cual se debe a la formación de vínculos inter-proteínicos a través de interacciones hidrofóbicas (Li, Wang, *et al.*, 2016), lo que indica la formación inmediata de la monocapa. No obstante se percibió que los hidrolizados de proteína de soya (SPH), tienden a decrecer el módulo elástico luego de 20 minutos de iniciar el ensayo, por tanto se determina que la absorción de la monocapa formada es cinéticamente inestable, lo cual se evidenció igualmente sobre la inestabilidad de la emulsión durante el almacenamiento.

El trabajo desarrollado por Li *et al.* (2016), Determinó que la capa interfacial formada por SPH y el caseinato de sodio fue frágil y el correspondiente módulo elástico fue relativamente más bajo que el presentado por las demás proteínas, sin embargo la absorción de la capa formada por el caseinato de sodio parece ser más estable a lo largo del tiempo, de acuerdo con el autor, la capa interfacial de esta proteína fue capaz de contener largas deformaciones sin presentar fracturas estructurales.

## **4.2 ESTADO DEL ARTE**

**4.2.1 Tensión interfacial, propiedades reológicas y espumantes en alimentos.** Muchos alimentos son conformados por dispersiones que se presentan bajo la forma de espuma, emulsiones y/o una combinación de ambas (Eric Dickinson, 1992). Las espumas alimentarias, son de gran interés tecnológico pues dichos sistemas proveen diversas

texturas en distintos productos como helados, cremas, merengues, bebidas espumantes, productos de panadería o alimentos nuevos con bajo contenido de grasa (Perez, 2012).

La formación de espuma y su estabilidad son fenómenos que deben comprenderse para reconocer los mecanismos por los cuales puede llegar a desestabilizarse (Langevin, 2000). Es así que la estabilidad es normalmente afectada por mecanismos como el drenaje de líquido, desproporción y coalescencia (ruptura de la burbuja por la lamella) (Figura 1.0), entre otros (Langevin, 2000), por lo tanto la aparición de estos fenómenos promueve la destrucción de la espuma (Perez, 2012), haciendo importante tener el conocimiento de los factores que gobiernan la formación y la estabilidad de la espuma, pues simultáneamente proveen información sobre la vida útil y características sensoriales de los alimentos .

**Figura 1.** Formación y estabilidad de la espuma



Fuente: (Perez, 2012)

Para lograr el propósito de formar espuma, se requiere el aporte de un tipo de energía capaz de incrementar el área interfacial alrededor de la burbuja, pues gracias a la superficie libre que se presenta en este espacio, se da origen a un sistema termodinámicamente inestable que eventualmente ocasiona que colapse rápidamente la

burbuja, por lo cual se hace necesario superar esta carga energética de tal forma que se garantice producir una espuma con entropías estables, lo cual contribuirá a satisfacer las necesidades de los consumidores (Perez, 2012). Para lograr vencer esta energía libre presente en los espacios interfaciales, se ha propuesto la incorporación de sustancias con un efecto tensoactivo (McClements, 1998).

La mayoría de tensoactivos y proteínas por su naturaleza dual reconocida como hidrófoba e hidrófila, poseen la habilidad de ubicarse sobre la interface (Valderrama, 2006). En el caso de la interfaz aire-agua, coexiste una energía libre entre 72.5 y 73 mJ/m<sup>2</sup>, esto quiere decir que si algún compuesto con acción surfactante como las proteínas, desean ubicarse en esta área interfacial (aire-agua), deberán ser capaces de reducir considerablemente esta energía, eventualmente esto se traducirá en la reducción proporcional de la tensión interfacial de la disolución (MacRitchie y Fletcher, 1990), alternamente se completará la formación de una bicapa de moléculas anfifílicas absorbidas sobre la superficie de la burbuja. A continuación se muestra en la imagen 1.0, algunos valores típicos de tensiones interfaciales y superficiales en N/m a la temperatura ambiente.

**Tabla 1.** Tensiones Superficiales/interfaciales de algunas sustancias de interés a temperatura ambiente en N/m.

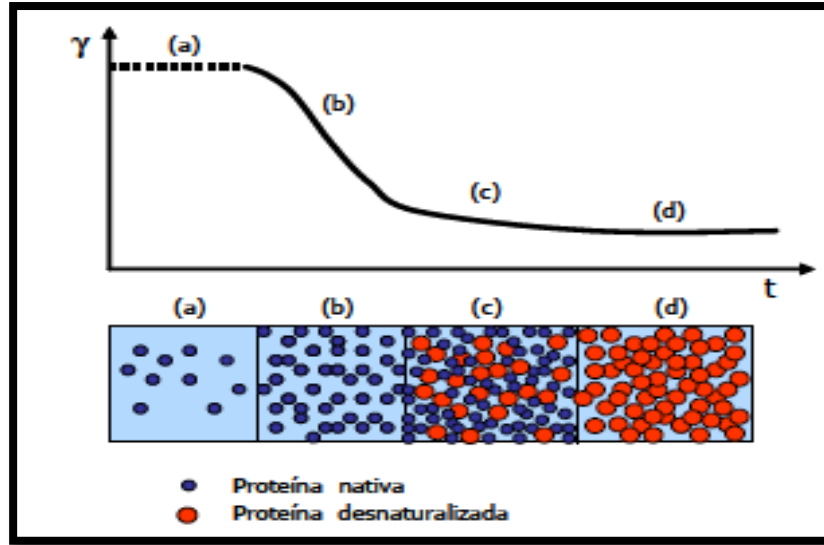
Material	Frente al aire	Frente al agua
Agua	72	0
Disolución saturada de NaCl	82	0
Etanol	22	0
Triglicéridos	34	27
Mercurio	484	415

Fuente: (P Walstra y VAN VLIET, 2010).

Las proteínas suelen ser los agentes tensoactivos de elección en la industria alimentaria, especialmente para la formación de espumas y emulsiones (Eric Dickinson, 1992; E Dickinson, 1992; Pieter Walstra, 1993). De esta manera las propiedades espumantes de las proteínas dependen de su fuerte tendencia a absorberse sobre la interface aire-agua y por su capacidad de reducir la tensión superficial (Perez, 2012). El proceso mediante el cual el tipo de moléculas anfifílicas se dirigen desde el seno de la disolución a la interfaz y se concentran allí se denomina adsorción y el análisis de la evolución de la tensión interfacial del sistema a lo largo del proceso de adsorción proporciona información estructural de la película interfacial formada (Valderrama, 2006).

La dinámica del proceso de adsorción ocurre cuando las proteínas en disolución acuosa, tienden a adoptar una configuración en la cual los grupos apolares se congregan en la molécula, los grupos polares se disponen en la superficie para interactuar predominantemente con el agua, mientras que los no polares lo harán con la fase apolar, de esta manera la energía del sistema se minimiza y es conocido con el nombre de “desnaturalización interfacial” (Valderrama, 2006). A continuación se muestran las etapas del proceso adsorción en términos de la disminución de la tensión interfacial de la disolución.

**Figura 2.** Etapas del proceso de adsorción dinámica de proteínas en la interface



Fuente: (Wege *et al.*, 2002)

En la figura 2 se distinguen tres regiones en la dinámica de adsorción en la interface: Periodo de difusión (a), periodo de penetración (b-c) y periodo de saturación (c-d) (Wege *et al.*, 2002). En el periodo de difusión, La velocidad de cambio de la concentración superficial ( $\Gamma$ ) se puede expresar como sigue (MacRitchie, 1978):

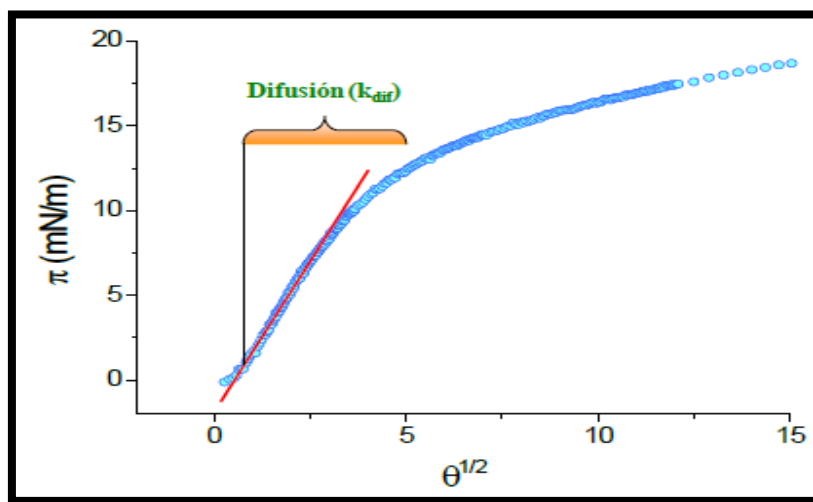
$$\left(\frac{d\Gamma}{d\theta}\right) = \left(\frac{d\Gamma}{d\pi}\right) \left(\frac{d\pi}{d\theta}\right)$$

Si ( $d\Gamma/d\pi$ ) es constante, entonces ( $d\pi/d\theta$ ) puede usarse para evaluar la velocidad de adsorción de la proteína. En el periodo de difusión, según MacRitchie y Flecher (MacRitchie y Fletcher, 1990), a cortos tiempos de adsorción y en ausencia de convección, la etapa de difusión esta conducida por un gradiente de concentración, durante esta etapa es posible emplear la ecuación de Ward y Tordai (Ward y Tordai, 1946), para correlacionar la variación de la presión interfacial con el tiempo de adsorción:

$$\pi = 2CoKT \left(\frac{D\theta}{3.14}\right)^{\frac{1}{2}}$$

Donde,  $C_0$  es la concentración de proteína en la subfase,  $K$  es la constante de Boltzman,  $T$  es la temperatura absoluta, y  $D$  es el coeficiente de difusión. Si la etapa de difusión hacia la interface controla el proceso de adsorción, existe una relación lineal entre la presión superficial y la raíz cuadrada del tiempo (De Feijter y Benjamins, 1987; MacRitchie & Fletcher, 1990). Verificada esta dependencia, se obtiene la constante de difusión,  $k_{dif}$ , a partir de la pendiente de dicha gráfica mediante ajuste de los datos experimentales al modelo de regresión lineal simple (Figura 3).

**Figura 3.** Aplicación del modelo cinético modificado por Ward y Tordai (1946) para el cálculo de la constante de velocidad de difusión de una proteína hacia la interfase aire-agua.



Fuente: Ward y Tordai (1946)

Adicionalmente, la velocidad de adsorción interfacial se considera de gran relevancia en la formación de espumas (Damodaran, 1990; Eric Dickinson, 1992), pues durante la adsorción, la reducción de la tensión superficial es un requisito muy importante, tanto para optimizar el consumo de energía involucrado en el proceso de espumado como para lograr un tamaño de burbuja pequeño, factor que contribuye a generar estabilidad (Damodaran, 1990).



Es así como resulta realmente importante comprender los fenómenos de estabilidad termodinámica que ocurren en la interface aire-agua de la burbuja, pues es de gran interés para la formación industrial de espumas, atrayendo la atención de investigadores quienes han logrado encontrar múltiples maneras de vencer la energía libre que se encuentra en la interfaz, tal como se demostrado trabajos previos (Lazidis et al., 2015), donde se estudió la capacidad de la proteína de soya para producir espumas estables, y su estrecha relación con la habilidad de adsorberse en la interface aire-agua, además logró concluir que una alta densidad de partículas en la interface de la burbuja, incrementa la viscosidad, hecho que mejora la estabilidad de la espuma, al prevenir el drenaje.

Otra de las propiedades de las espumas, son el resultado luego de someterlas a un esfuerzo o deformación, de acuerdo con trabajos orientados en comprender el comportamiento reológico de las espumas (Yan *et al.*, 2012), fue encontrado que la adsorción de proteína en la capa de la interface, contribuye a recrear un comportamiento elástico. Similarmente lo anterior fue corroborado, luego de adelantar estudios correspondientes a las propiedades reológicas interfaciales de las espumas, concluyendo que hay tendencia predominantemente elástica en materiales que poseen la presencia de burbujas (Gorlier, Khidas, y Pitois, 2017).

**4.2.2** Propiedades reológicas interfaciales y comportamiento viscoelástico de las espumas alimentarias. La incorporación de agentes emulsificantes e hidrocoloides en alimentos, ha sido de gran interés en la industria (Vohra y Kratzer, 1991), especialmente por su aporte estabilizante en emulsiones alimentarias (K. D. Martínez, Sánchez, Patino, y Pilosof, 2009) que por su condición inicial son sistemas termodinámicamente inestables y dependen de las propiedades interfaciales y los componentes superficiales activos (Dickinson, 2001). Es así que las proteínas pueden conceder cierta actividad superficial, pues ayudan efectivamente a reducir la tensión interfacial y eventualmente a facilitar

procesos como el de emulsificación (Bos y van Vliet, 2001), gracias a la conformación de una red elástica sobre la interfaz de la gota.

Estas modificaciones en la flexibilidad de la interface como el de la red elástica, pueden ser monitoreadas paralelamente a través de la aplicación de fuerzas de cizalla sobre la superficie/interface, conocido como agitación reológica superficial (Dickinson y Hong, 1995). En el caso de la espumas, la formación de estas se da por la adsorción de agentes espumantes sobre la interfaz aire/agua y su habilidad para reducir la tensión superficial, sin embargo la estabilización de espumas requiere de propiedades superficiales tales como la conformación de una red cohesivamente viscoelástica alrededor de la superficie de la burbuja, a través de interacciones intermoleculares (Dickinson y McClements, 1995). De acuerdo con los ensayos de reología, es posible deformar un material de varias maneras, permitiendo conocer el comportamiento de los materiales y su tendencia a ser sólido o más líquido, es de esta manera los ensayos oscilatorios, permiten estudiar la viscoelasticidad de los materiales, según su módulo de almacenamiento  $G'$  o de pérdida  $G''$  (Choi, Lim y Yoo, 2004). Tal es la aplicación de estas técnicas para caracterizar el comportamiento de los materiales, que incluso se han llevado a cabo estudios en espumas derivadas de clara de huevo y azúcar, encontrando un carácter predominantemente elástico  $G'$  sobre  $G''$  y definiendo que la espuma con ese tipo de ingredientes, muestra un comportamiento semi-sólido (Tirado, Acevedo, y Torres, 2015).

## **5. METODOLÓGIA**

### **5.1 MATERIALES**

**5.1.1** Aceite de Aguacate. Para los ensayos y preparaciones correspondientes a la elaboración de las emulsiones, se empleó aceite de aguacate comercial de nombre Mira Premium con volumen de 250 ml, adquirido en un centro comercial en la localidad de Bogotá D.C.

**5.1.2** Proteínas. Las emulsiones fueron elaboradas a partir de Caseinato de Sodio, grado alimentario con una pureza del 99%, su presentación es en polvo con una apariencia color blanco crema, almacenado en bolsas plásticas herméticas, provenientes de la marca Foodchem (Canada). Los ensayos también se realizaron con Albumina de huevo, grado alimentario con una pureza del 99%, su característica especial es que se encuentra en forma de polvo de color amarillo, adquirido a la empresa Casa-Químicos (Bogotá-Colombia), la cual suministra el producto en bolsas plásticas herméticamente selladas.

**5.1.3** Hidrocoloides. Para efectos de este estudio, se elaboraron emulsiones con mezclas de proteínas e hidrocoloides, para este último se consideró aplicar Goma Arábica, el cual es un polvo fino blanco-amarillento, grado alimentario y de presentación en frasco sellado, adquirido a la empresa Casa Químicos, en tanto que la Goma Xantan, fue suministrada por la casa comercial Que en (Ibagué-Colombia), grado alimentario y con una apariencia en polvo blanco almacenado en bolsas plásticas herméticas.

**5.2** PREPARACIÓN DE DISOLUCIONES DE PROTEÍNA (ALBUMINA Y CASEINATO DE SODIO).

El método de disolución fue definido durante el trabajo de investigación, pesando preliminarmente las proteínas en una balanza analítica (Dayhan, Alemania) para luego disolverlas en 30 ml de agua destilada, a continuación las soluciones se dispusieron en tubos falcón de 50 ml debidamente rotulados y llevados a ultraturrax (Dayhan, Alemania) durante 5 minutos a 14000 rpm para mejorar la solubilidad de las proteínas.

**Figura 4.** Preparación de disoluciones de proteína (Albumina y Caseinato de Sodio)  
Peso, homogenización, y sonicación de disoluciones de proteína



Fuente. El autor

A continuación se describen las concentraciones estudiadas para cada proteína.

**Tabla 2.** Concentraciones de Proteína.

Proteínas		
Número de ensayo	Ovoalbúmina %p/v	Caseinato de Sodio %p/v
1	1%	3.6%
2	1.2%	3.8%
3	1.4%	4.0%
4	1.6%	4.2%
5	1.8%	4.4%
6	2.0%	4.6%
7	2.2%	4.8%
8	2.4%	5.0%
9	2.6%	5.2%

<b>10</b>	-	5.4%
<b>11</b>	-	5.6%

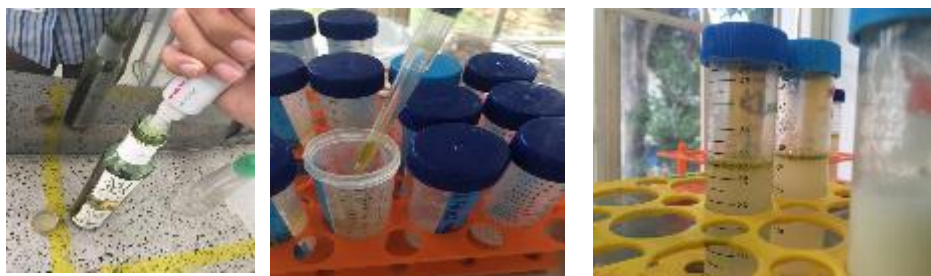
Fuente. El autor

### 5.3 PREPARACIÓN DE EMULSIONES DE ACEITE DE AGUACATE A PARTIR DE ALBUMINA Y CASEINATO DE SODIO.

Las disoluciones previamente homogenizadas, fueron llevadas al ultrasonido para realizar una homogenización más completa siguiendo las condiciones anteriormente descritas en la etapa de disolución de las proteínas. Luego a cada muestra se le adicionó aceite de aguacate de tal manera que se obtuvieron emulsiones al 2%, usando un ultrasonido marca Hielsher (USA), a condiciones de amplitud de 100 %, y frecuencia de 26 kHz durante 3 minutos para garantizar una mayor solubilización. Las emulsiones fueron inmediatamente analizadas para caracterizar las propiedades de acuerdo a la tabla 4.

**Figura 5.** Preparación emulsiones a partir de aceite de aguacate con disoluciones de proteína

Adición de aceite de Aguacate, y emulsificación en disoluciones de proteína



Emulsificación en disoluciones de proteína por sonicación



Fuente. El autor

**Tabla 3.** Variables Respuesta del Diseño Experimental

Variables respuesta	Unidades	Método
Tensión interfacial	mN/m <sup>2</sup>	Gota pendiente
Módulo Elástico	mN/m <sup>2</sup>	Gota pendiente/Oscilatorio
Módulo de viscosidad	mN/m <sup>2</sup>	Gota pendiente/Oscilatorio
Estabilidad de espuma	Segundos	Formación de espuma/Foamscan (Teclis)
Volumen de espuma final	ml	Formación de espuma/Foamscan (Teclis)

## 5.4 MEZCLA DE PROTEÍNA CON HIDROCOLOIDES

Para efectos de la evaluación de las emulsiones con mezclas de proteínas con hidrocoloides, se tuvieron en cuenta los parámetros del paso de luz a través de la celda de cuarzo que contiene las muestras, pues la saturación de las disoluciones impide la visualización y lectura de las imágenes por el controlador del tensiómetro de gota, siendo óptimo y adecuado seleccionar concentraciones bajas y no tan altas que impidan por completo el paso del haz de luz. Igualmente fueron seleccionadas concentraciones de proteína de acuerdo al costo/beneficio según el mercado y la aplicabilidad del desarrollo de la espuma a nivel de industrial, donde se debe considerar que el costo comercial de la Albumina está incluso hasta cinco veces por encima del valor del Caseinato de Sodio según la calidad, por lo tanto no es una proteína económica en el experimento, para ello se tomaron las condiciones intermedias de las concentraciones de las proteínas (Ovoalbúmina al 1.8% y Caseinato al 4.8% y mezcladas con dos tipos de hidrocoloides de acuerdo con la tabla 5 y 6.)

**Tabla 4.** Mezclas de Albumina (% p/v) con hidrocoloides (% p/v)

Tratamientos		Hidrocoloides %p/v	
<b>Albumina</b> <b>1,8</b>	Goma Xantan 0.4%	Goma Arabiga 0.4%	

Fuente. El autor

**Tabla 5.** Mezclas de Caseinato de Sodio (% p/v) con hidrocoloides (% p/v)

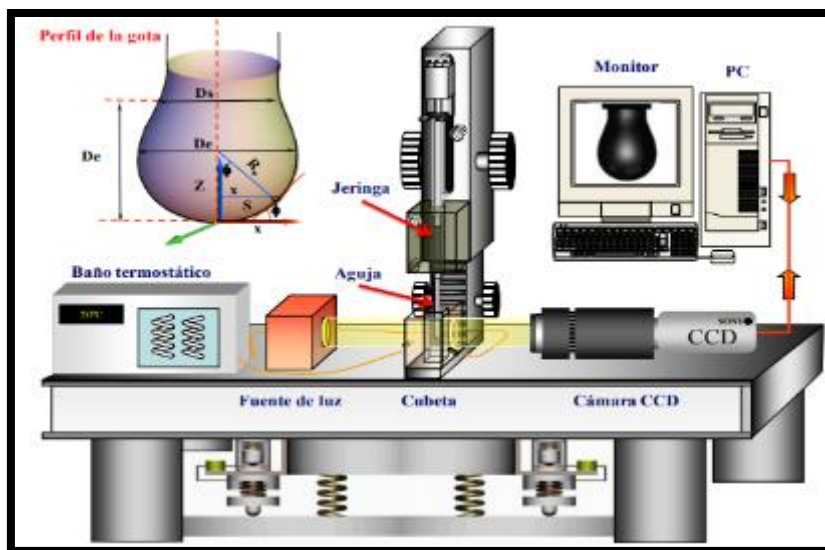
Tratamientos		Hidrocoloides %p/v	
<b>Caseinato 4.8%</b>	Goma Xantan 0.4%	Goma Arabiga 0.4%	

Fuente. El autor

## 5.5 DETERMINACIÓN DE LA TENSIÓN INTERFACIAL

Este ensayo se llevó a cabo en un tensiómetro de gota digital de marca Teclis (Francia), este equipo permite obtener la respuesta de la tensión interfacial/superficial tras someter el área de la interface a una deformación, llevada a cabo mediante ciclos de expansión y contracción del volumen de la burbuja ( $4\ \mu\text{l}$ ), junto a esto se suma el efecto producido por el agente superficialmente activo sobre la interface aire-emulsión. Esta respuesta también describe el comportamiento reológico de la interface. En la unidad de medida del Tracker se dispone la cubeta con un volumen de 10 ml, en la figura se pueden distinguir básicamente los siguientes compartimentos (Figura 4):

**Figura 6.** Tensiómetro de gota digital. Teclis



Fuente: (Perez, 2012)

## 5.6 DISPOSITIVO DE FORMACIÓN DE LA GOTA

En este compartimento se forma y controla una gota de solución bajo análisis. Consta de dos partes: la primera consiste de una jeringa acoplada a un capilar (aguja) y a un sistema de impulsión; la segunda consta de una cubeta de vidrio cubierta por un dispositivo que permite el control de la temperatura del sistema de medición. Estas dos



partes están localizadas en un compartimento que permite realizar movimientos verticales y laterales en forma separada (Tracker, IT Concept, 2017).

**Sistema óptico:** Este incluye una fuente de luz, lentes y una cámara CCD. La gota se ilumina mediante una fuente de luz uniforme, de forma que su perfil es recogido por la cámara CCD y una PC (Tracker, IT Concept, 2017). La evaluación de los cambios en la tensión interfacial al someter la burbuja en contacto con las emulsiones de aceite de aguacate, fueron registrados a través del método de gota pendiente, el cual fue adaptado a condiciones de laboratorio (Labourdenne et al., 1994), donde la emulsión previamente diluida fue dispuesta sobre una cubeta para la respectiva lectura, mientras que la burbuja (fase dispersa) se suspendió por la jeringa. El volumen de la gota para este procedimiento fue de 4  $\mu\text{l}$  y se realizó a temperatura ambiente con la finalidad de simular la dispersión aire/emulsión, pues la silueta delineada por la gota es tomada por una cámara CCD y luego digitalizada, posteriormente las imágenes digitales fueron grabadas en el tiempo y ajustadas a la ecuación de Young-Laplace con el fin de obtener la tensión interfacial, contando para ello con el software drop Tensimeter Teclis, Los ensayos realizados se efectuaron de acuerdo con la fase dispersa, que para efectos de este trabajo corresponderán aire/emulsión (Labourdenne et al., 1994).

**5.6.1** Determinación de la velocidad de difusión ( $K_{\text{dif}}$ ). Los estudios de la tensión superficial en las proteínas, permite entender diferentes mecanismos de adsorción e interacciones intermoleculares involucradas en la interface de una emulsión (Damodaran, 1990). Estos ensayos pueden llevarse a cabo en base al fenómeno de la cinética de adsorción de la proteína sobre la interface aire-liquido, a través de los cambios registrados en la presión superficial ( $\pi$ ) en función del tiempo (Carranza-Saavedra, Váquiro, León-Galván, Ozuna, & Solanilla, 2016). Este tiempo de adsorción determina el incremento de la presión superficial ( $\pi$ ) la cual está definida de la siguiente manera:  $\pi = \sigma_0 - \sigma$ , donde  $\sigma_0$  es la tensión superficial de la disolución acuosa, y  $\sigma$  es el valor de la tensión superficial en presencia de la proteína (Mitropoulos, Mütze, & Fischer, 2014), continuando con el proceso de adsorción de la proteína, una de las fases iniciales

corresponde a la Difusión de las moléculas de la proteína desde el seno de la fase acuosa hacia la interface.

La etapa de Difusión al mantenerse controlante, puede correlacionarse a través de la variación de la presión interfacial con el tiempo

$$\pi = 2 \times C_0 \times K \times T \times \left( \frac{D \times \theta}{3.14} \right)^{1/2}$$

Donde  $C_0$  es la concentración de proteína en la subfase,  $K$  es la constante de Boltzman,  $T$  es la temperatura absoluta, y  $D$  es el coeficiente de difusión. De igual manera puede obtenerse a través de una representación gráfica (Figura 3.0) de la presión interfacial ( $\pi$ ) frente a la raíz cuadrada del tiempo (De Feijter, Benjamins, y Tamboer, 1987; MacRitchie, 1978; Tornberg, 1978; Xu y Damodaran, 1994). En la práctica, esta representación gráfica permite obtener una región lineal, donde finalmente la pendiente corresponderá a la velocidad de Difusión.

## Figura 7. Ensayos en Tensiómetro de gota

### Preparación de muestras para ensayos interfaciales



### Incorporación de muestras al equipo para lecturas en el Tensiómetro



Fuente. El autor

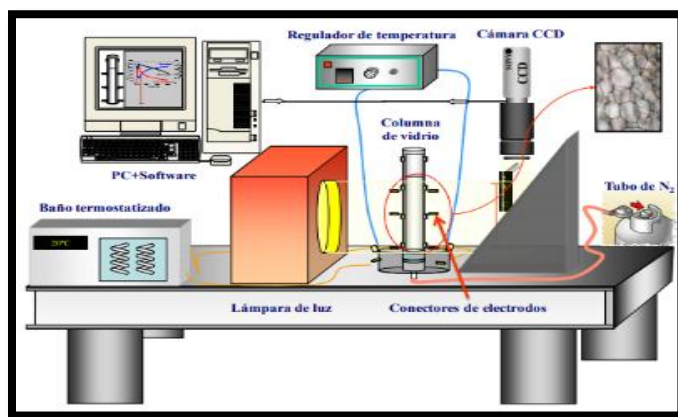
## 5.7 DETERMINACIÓN DEL COMPORTAMIENTO VISCOELÁSTICO POR TENSIOMETRIA OSCILATORIA

Para este ensayo se sometió la burbuja a esfuerzos sinusoidales de compresión y expansión en las emulsiones de aceite de aguacate previamente diluidas con el fin de conseguir deformar el área superficial, Saulnier *et al.*, (2001), el cual propone la aplicación de movimientos armónicos sinusoidales a través del método de gota pendiente con periodos (pulsaciones) que comprenden un rango de 2 a 100 segundos, amplitud de 4 mm y frecuencia de 0.06283 Hz, cada perturbación tendrá tres repeticiones. El experimento fue llevado a cabo en un tensiómetro de gota digital de marca Teclis (Francia). Las alteraciones en la tensión superficial por cada pulsación, se registraron e integraron por un análisis armónico a través del software Windrop, ITConcept, Longessaigne, France, el cual permite el cálculo del módulo elástico  $G'$  y el de pérdida  $G''$  (Saulnier *et al.*, 2001).

## 5.8 PROPIEDADES ESPUMANTES

Las propiedades espumantes de las emulsiones de aceite de aguacate fueron caracterizadas a través de la formación de espuma y la medida de estabilidad por medio del instrumento Foamscan (Teclis, Francia), y consta de las siguientes partes:

**Figura 8.** Analizador de Espuma. Teclis



Fuente: (Perez, 2012)

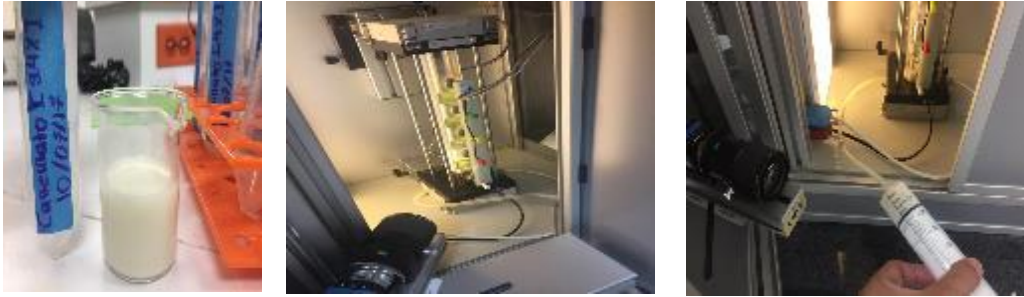
Columna de espumas: Es un recipiente de paredes de vidrio opaco donde se genera la espuma. El tubo de vidrio contiene dos hileras de cuatro conectores para electrodos, cada una dispuesta longitudinalmente a lo largo de dicho tubo. La columna es apoyada en una plataforma hueca de forma circular y extraíble del cuerpo de la urna. En dicha plataforma se encuentran los orificios de entrada y salida del agua de termostatización, y un orificio central en cuya base se coloca una placa porosa (diámetro de poro  $0,2\ \mu\text{m}$ ) y donde se deposita el sistema bajo estudio. Además, en la parte inferior de dicha base se encuentra el orificio destinado a la entrada del gas y el orificio destinado a la salida del sistema una vez que finalice la experiencia. Acoplada a la urna existe una videocámara CCD que permite visualizar el desarrollo de la espuma, ésta es la que proporciona las medidas del volumen de la espuma (Tracker, IT Concept, 2017).

El sistema también posee un sistema de electrodos que son los encargados de la medida de la conductividad a diferentes alturas de la columna y son los encargados de medir el volumen de líquido que se incorpora a la espuma. En el fondo de la columna existe un par de electrodos usados para determinar la cantidad de líquido que no se ha incorporado a la espuma. Por lo general, la realización de estas experiencias conlleva la determinación previa de una serie de parámetros referentes a las condiciones de experimentación. Así, es necesario fijar el flujo de gas que se va a inyectar en la disolución, que debe permitir la formación de una espuma uniforme y reproducible (Tracker, IT Concept, 2017).

Los análisis de espumeo se han descrito previamente por otros autores (Sánchez & Patino, 2005). Este análisis permite obtener información de la espuma, la cual puede ser determinada por conductividad y medidas ópticas. Para efectos de esta investigación, se procedió a inyectar gas (nitrógeno) a un flujo de 45 ml/min a través de un filtro de vidrio con poros (diámetro filtro 0.2 mm), el volumen inicial de la dispersión coloidal será de 40 ml, mientras que las mediciones de la formación de espuma fueron tomadas por una cámara CCD, en tanto que el drenaje de la espuma se cuantifico por la conductividad a diferentes alturas de la columna. Inicialmente los experimentos que se llevaron a cabo, fueron ajustados a un volumen de 100 ml, en tanto que el burbujeo se detuvo tan pronto como la evolución de la espuma alcanzo su máximo nivel. Los resultados posteriores frente a la distribución y el tamaño de burbuja, fueron igualmente reportados por el software FoamscanTeclis.

**Figura 9.** Ensayos en Analizador de espuma.

Preparación de muestras para ensayos de espumeo



Fuente. El autor

## 5.9 DISEÑO EXPERIMENTAL

Los experimentos se llevaron a cabo utilizando niveles de proteína diferentes, por lo cual no resulta comparativo realizar análisis estadísticos entre ellas, de tal manera se propuso un diseño experimental tanto para cada proteína, el cual consistió en un diseño de Un Solo Factor Categórico Individual con nueve niveles completamente aleatorizados para Albumina y once para el Caseinato de Sodio (Tabla 2.0) a la cual se le adicionaron etiquetas definidas de su concentración. Los resultados correspondientes a la formación de espuma fueron analizados a través del software STATGRAPHICS centurión XVI, usando análisis de varianza ANOVA y diferencias mínimas significativas entre los grupos por el Test LSD.

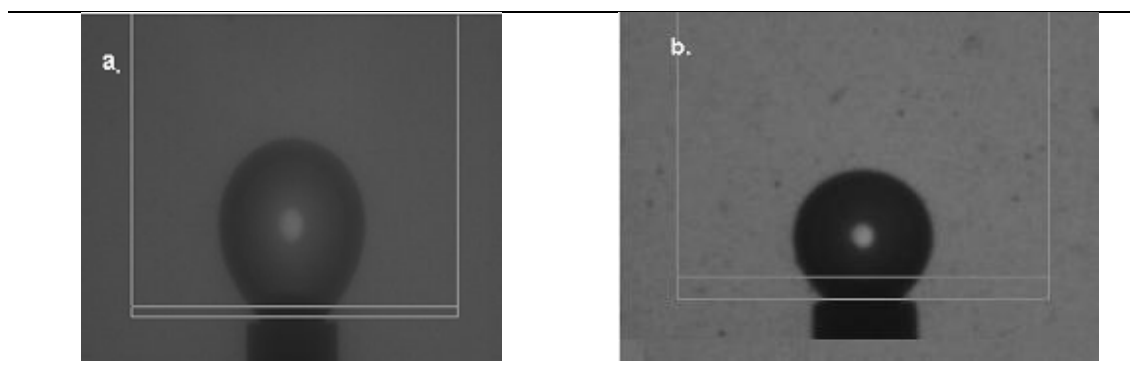
## 6. RESULTADOS Y DISCUSIONES

### 6.1. ANÁLISIS DE TAMAÑO DE PARTÍCULA EN EMULSIONES DE ACEITE DE AGUACATE

En el diseño experimental original, se consideraba emplear ambas proteínas Albumina y Caseinato de sodio a concentraciones similares sobre las emulsiones de aceite de aguacate, con el objetivo de lograr comparar los resultados de forma simultánea, no obstante en ensayos preliminares se identificó dificultades para la medición de las variables en el tensiómetro de gota, pues a concentraciones bajas, el Caseinato no permite que la luz proveniente del equipo, atraviese la solución depositada en la celda, creando una imagen completamente oscura y distorsionada, mientras que dichos efectos no se apreciaban sobre las emulsiones elaboradas a partir de albumina. Lo anterior permitió asumir que las proteínas poseen cierto efecto sobre el tamaño de partícula de aceite, por lo cual se propuso un diseño experimental de un solo factor categórico para cada proteína, de tal forma que con Caseinato de Sodio se permitiera incrementar las concentraciones por encima de las de albumina que fueron inicialmente propuestas y de esta manera ver el posible efecto sobre la imagen en el tensiómetro digital en tiempo real.

**Tabla 6.** Imágenes burbuja de aire en emulsiones de Aceite de aguacate con Caseinato de Sodio

<b>Imágenes burbuja de aire en emulsiones de Aceite de aguacate con Caseinato de Sodio</b>	
<b>a. Emulsiones de aceite de aguacate con Caseinato 3.6%</b>	<b>b. Emulsiones de aceite de aguacate con Caseinato 5.6%</b>



Fuente. El autor

A medida que fue incrementada la concentración de Caseinato de sodio en las emulsiones, fue posible observar mayor claridad en las imágenes tal como se compara en las muestras de la figura 6.0, haciendo óptimo el funcionamiento del equipo durante las mediciones. Comportamiento similar se observó al aumentar las concentraciones en las emulsiones elaboradas con albumina (Figura 7)

**Tabla 7.** Imágenes burbuja de aire en emulsiones de Aceite de aguacate con Albumina

<b>Imágenes burbuja de aire en emulsiones de Aceite de aguacate con Albumina</b>	
<b>a. Emulsiones de aceite de aguacate con Albumina 1.0%</b>	<b>b. Emulsiones de aceite de aguacate con Albumina 2.6%</b>

Fuente. El autor



Para confirmar el hecho de que las concentraciones de proteína inciden sobre el tamaño de partícula de aceite, las muestras fueron llevadas a un nano-Plus (Nanoplus, USA) con el fin de determinar el tamaño de partícula a diferentes concentraciones de la proteína. En la tabla 9.0 y en la gráfica 1 se presentan los resultados de diámetro promedio de partícula a diferentes concentraciones de Caseinato de sodio, encontrándose que a mayor concentración de proteína disminuye el tamaño de partícula.

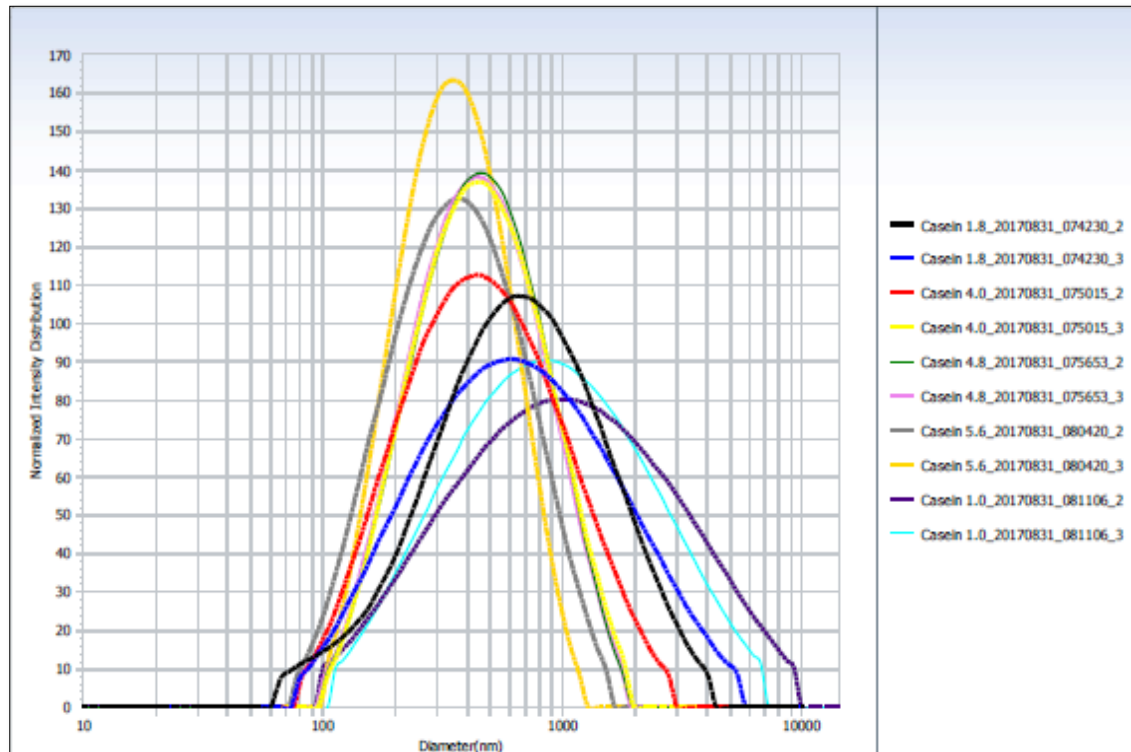
**Tabla 8.** Tamaño de partícula de aceite de aguacate en emulsiones a diferentes concentraciones de Caseinato de sodio.

<b>Concentración de Caseinato de sodio en emulsiones</b>	<b>Diámetro promedio de tamaño de partícula (nm)</b>
<b>Caseinato de Sodio 1.0%</b>	706
<b>Caseinato de Sodio 1.8%</b>	497
<b>Caseinato de Sodio 4.0%</b>	379.2
<b>Caseinato de Sodio 4.8%</b>	373.1
<b>Caseinato de Sodio 5.6%</b>	301.3

Fuente. El autor

Según los resultados de la Gráfica 1, incrementar las concentraciones del Caseinato de sodio influye en la disminución del tamaño de partícula de aceite de aguacate, permitiendo que la luz emitida por el tensiómetro de gota hacia la cubeta, logre atravesarla para luego ser conducida a los controladores y transformar la señal en los datos experimentales. Estudios han demostrado que incrementar la concentración de Caseinato de sodio, logran disminuir el tamaño de partícula de aceite de girasol en emulsiones aceite/agua (Hebishy, Buffa, Juan, Blasco-Moreno, y Trujillo, 2017), igualmente lo anterior se corroboró en emulsiones con aceite de pescado, al incrementar las concentraciones de Caseinato de Sodio de 1.0 a 5.0 %p/p, pues se logró reducir el tamaño de partícula de 0,88  $\mu\text{m}$  a 0,35  $\mu\text{m}$  (Alvarez Cerimedo, 2013).

**Figura 10.** Tamaño de partícula de aceite de aguacate en emulsiones con Caseinato de sodio.



Fuente. El autor

El incremento en las concentraciones de proteína, permitirá una mayor migración y disposición de moléculas de carácter anfifílico sobre la interface aceite/agua, logrando disminuir las tensiones interfaciales de la gota de aceite, siendo este momento el preciso para aplicar las fuerzas de cizalla sobre la interfaz, pues esta última se encontrará totalmente cubierta por los agentes emulsificantes, facilitando que se desprenda cierta parte de la capa de la superficie que eventualmente arrastrará con ella una porción de la fase oleosa, reconvirtiéndose y adquiriendo una reducción en el tamaño de la gota (Hasani, Pezeshki, y Hamishehkar, 2015).

Concentraciones de Caseinato de sodio entre 1.0 y 1.8%, fueron difícilmente visualizadas por el equipo, lo cual se debe a que la gota de aceite que está dispersa en la emulsión y de acuerdo con los datos arrojados, tienen un promedio de diámetro de 706 y 497 nm (tabla 9), esto en respuesta a que las gotas de aceite suspendidas se encargan de absorber la luz emitida, limitando el paso de la luz a través de la cubeta, sin embargo a medida que aumenta la concentración, su acción y efecto sobre la interface en el aceite, se ve reflejado sobre la disminución del tamaño y el paso de luz logra atravesar la muestra fácilmente. Por lo cual se decidió trabajar las emulsiones a partir de 3.6% a 5.6% con Caseinato de sodio, mientras que con albumina se emplearon concentraciones desde 1.0% a 2.6%, pues al incrementar el contenido superior a 2.6%, provocó la saturación en la celda que contenía la muestra, impidiendo una clara visualización de las imágenes.

## **6.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS EMULSIONES DE AGUACATE, ELABORADAS CON ALBUMINA Y CASEINATO DE SODIO.**

**6.2.1** Análisis de la tensión interfacial/superficial de emulsiones de aceite de aguacate, con Caseinato de sodio y Albumina sobre la interfaz aire-emulsión. A continuación se presentan los resultados para tensión interfacial/superficial obtenidos a diferentes concentraciones de Caseinato de sodio y Albumina en emulsiones elaboradas a partir de aceite de aguacate (Figura 7 y 8). En el momento en que se expuso la burbuja en contacto con las emulsiones que contenían la proteína, se observó una drástica reducción de la tensión interfacial/superficial a lo largo del tiempo, para ambas proteínas, pasando de 75 mN/m a valores medios de 45 mN/m e incluso llegando a 37 mN/m al emplear las máximas concentraciones, lo anterior demuestra que paralelamente la acción de la proteína, logra disminuir la energía libre, eventualmente ocasiona que el área interfacial se ocupe y por lo tanto genera estabilidad termodinámica al sistema, factor importante para garantizar que la burbuja no colapse. Lo anterior ha sido reportado previamente por estudios recientes, concluyendo que se logró disminuir la tensión interfacial/superficial en la interfaz aire-agua con la adición de disoluciones de albumina

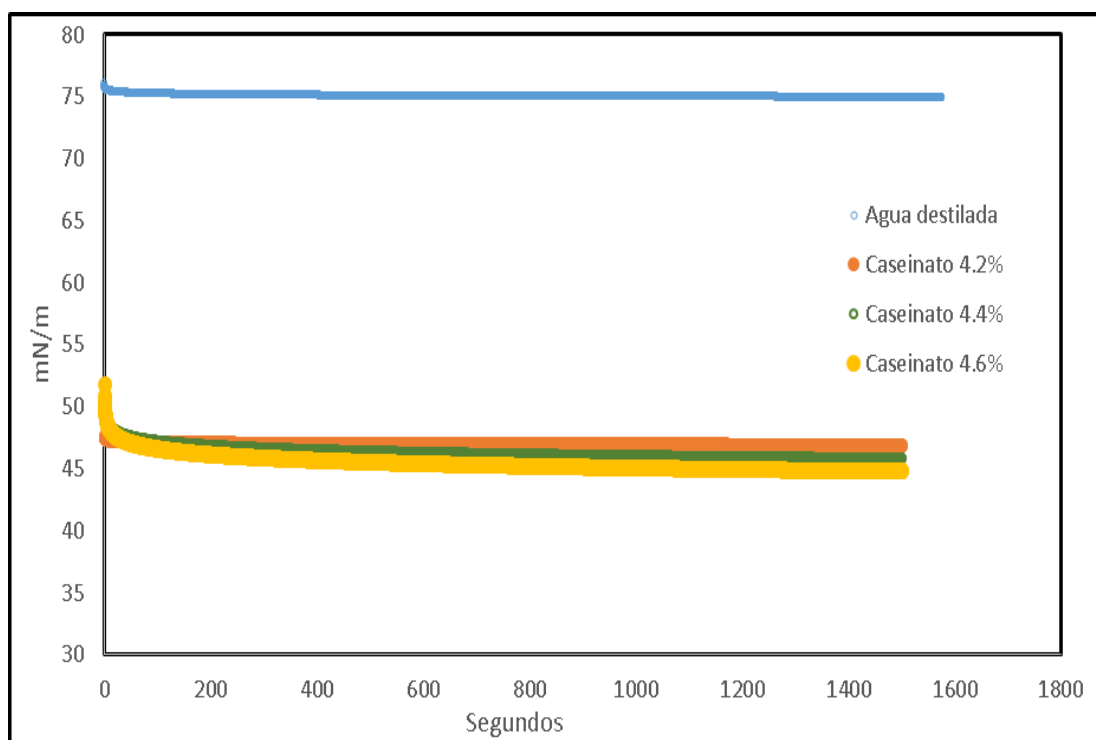
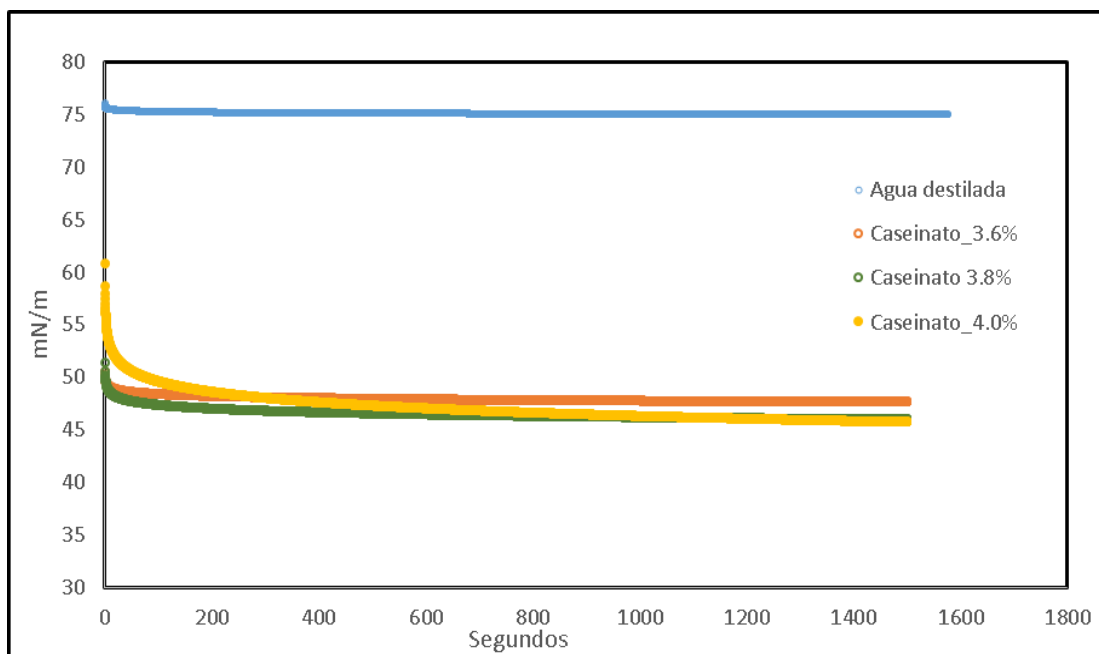
para luego comparar con la capacidad de formación de espuma (Miquelim, Lannes, y Mezzenga, 2010).

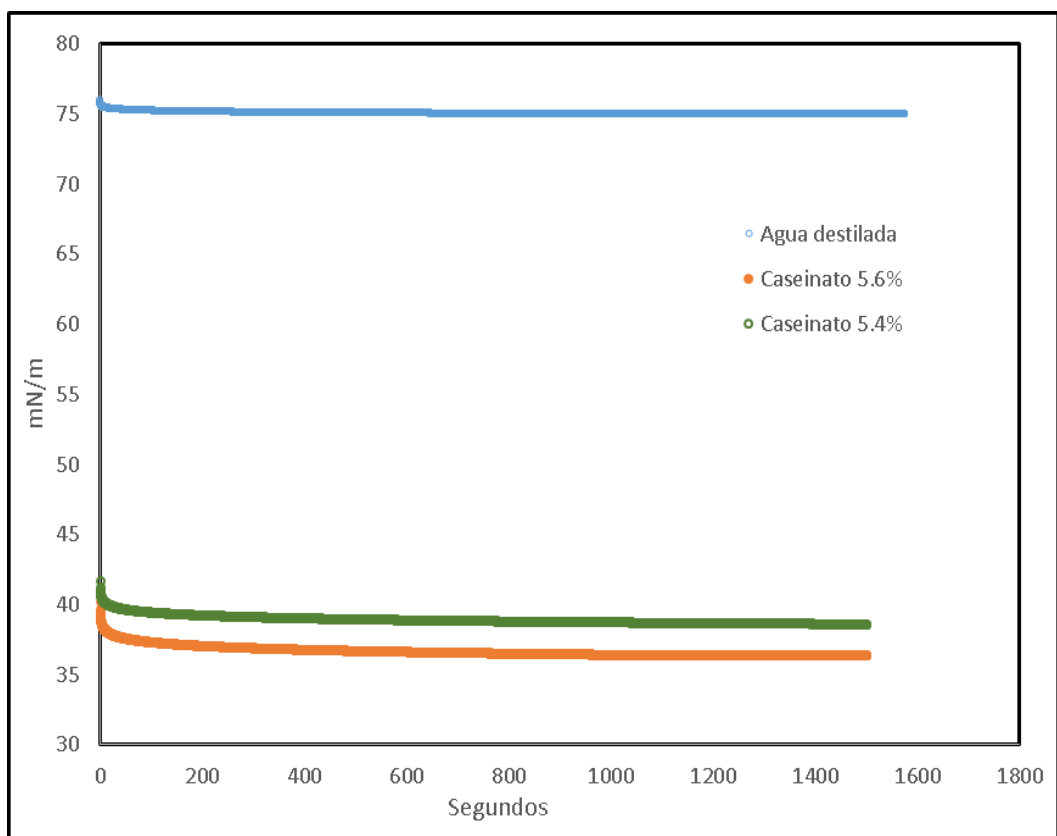
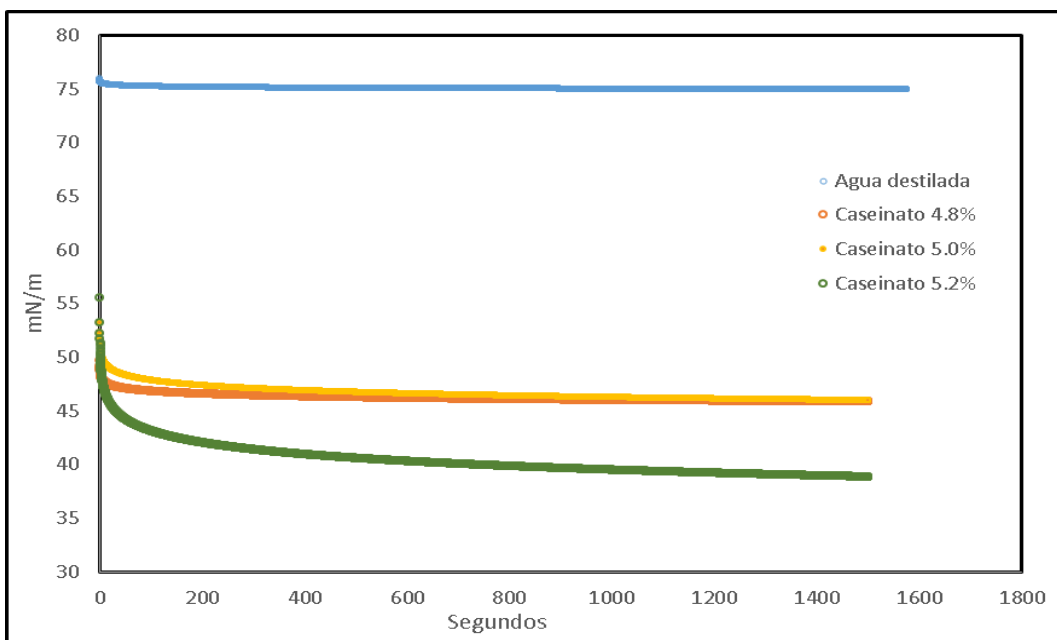
También se ha señalado sobre la disminución progresiva de la tensión superficial/interfacial al adicionar disoluciones de albumina, reportando que luego de modificar el punto isoeléctrico de la proteína (PI = 4.5) hasta un pH 4.0 fue posible alcanzar una disminución de la tensión superficial de 70 mN/m hasta 42 mN/M, simultáneamente el estudio logro corroborar que al incorporar Goma Xantan a las disoluciones con proteínas, se propiciaba un incremento moderado sobre la tensión, llegando a 43 mN/m, en tanto que la carragenina, logro disminuir hasta alcanzar 38 mN/m, lo anterior sucede gracias a que este último polisacárido está cargado negativamente, mientras que la proteína tiene una alta carga de residuos positivos, propiciando interacciones del tipo electrostáticas que a su vez incide sobre el decrecimiento de la tensión superficial, en tanto que Xantan apenas posee un leve carácter protonizado ( $H^+$ ) (Miquelim *et al.*, 2010).

Ensayos realizados con proteínas aisladas del suero de leche (Perez, 2012), lograron evaluar su capacidad de absorción sobre la interfaz aire-agua, llegando a concluir que la concentración de 1.0% p/p, es suficiente para reducir la tensión y saturar la interface aire-agua, igualmente el autor enfatiza en que la formación de una película interfacial saturada, es un requisito importante para la creación de espuma, además genera estabilidad frente a distintos mecanismos de desestabilización. Esta reducción de la tensión interfacial/superficial, se debe en gran medida a que las proteínas son molécula anfifílicas compuestas por una parte polar y otra no-polar de residuos de aminoácidos, consecuentemente estas se absorben en la interface, reorganizándose para exponer su residuo hidrofóbico a la fase hidrofóbica y su residuo hidrofílico a la fase acuosa (Burgess, 1993).

**Figura 11.** Tensiones interfaciales del aire en emulsiones de aguacate con Caseinato de Sodio

Tensiones interfaciales del aire en emulsiones de aguacate con Caseinato de Sodio

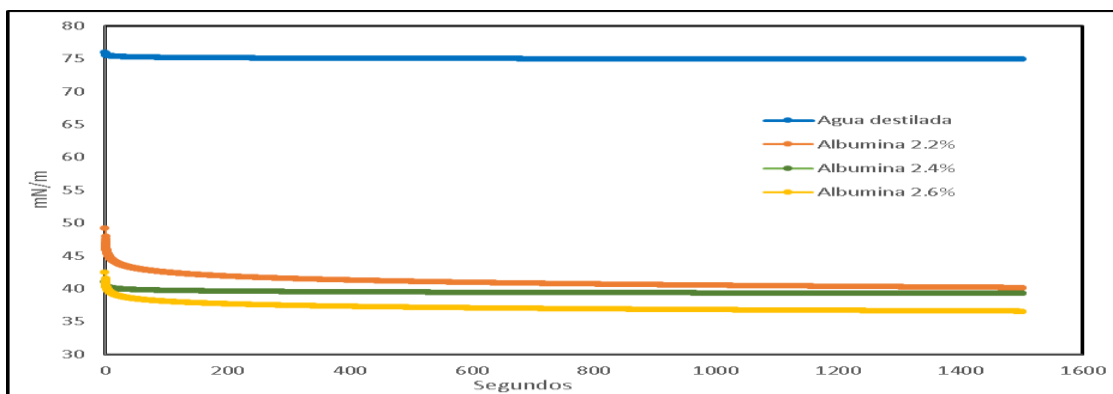
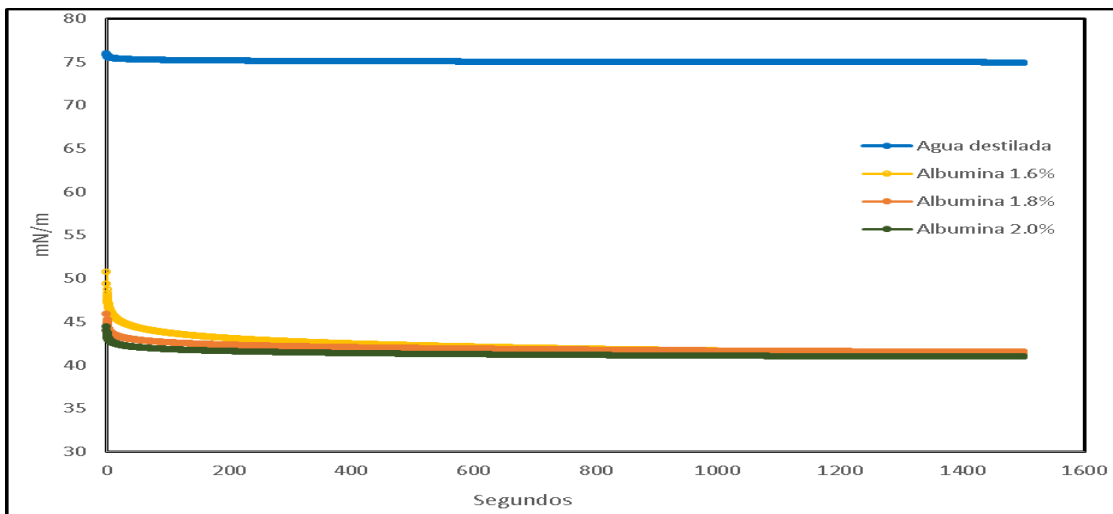
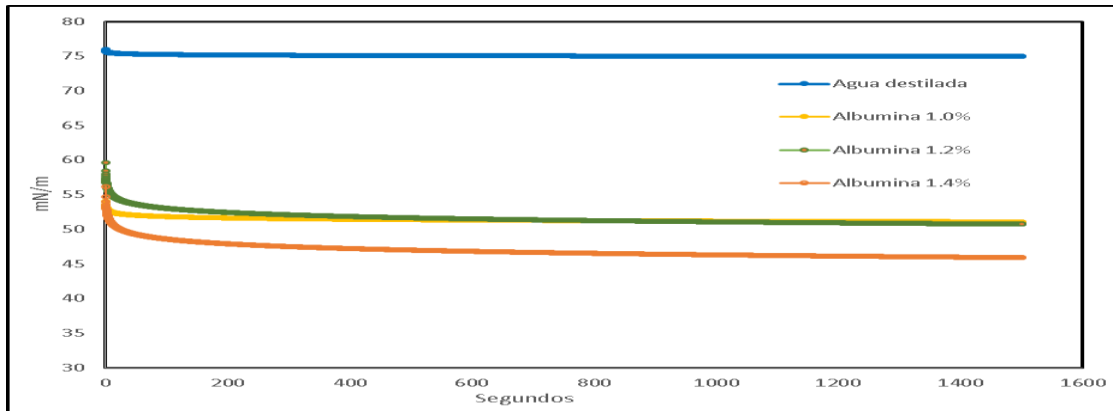




Fuente. El autor

De igual manera se observó, una reducción significativa de la tensión interfacial/superficial sobre la interface aire-emulsión al emplear albumina, llegando a la disminución de valores cercanos de 36mN/m, estos consiguen ser representativos en la medida que lograron reducir la tensión inicial de 75 mN/m, hasta las tensiones anteriormente reportadas. Se ha mencionado en diversos estudios que la actividad superficial está asociada con la funcionalidad de propiedades como las espumantes, destacándose estudios principalmente con la proteína de la soya y sus cualidades superficiales (K. D. Martínez et al., 2009). Otros estudios con proteínas globulares, también han confirmado una drástica reducción de la tensión sobre la interfaz aire-agua, tal como lo confirmaron al incrementar el estrés iónico y emplear concentraciones de 1 g/L, logrando disminuir hasta valores de 49.7 mN/m (Schmidt, Novales, Boué, & Axelos, 2010), el autor también logro identificar una presunta disminución de la tensión interfacial a medida que incrementaba la concentración de la proteína, identificando que al emplear la proteína al 0.1 g/L logro alcanzar una tensión de alrededor de 54.2 mN/m, mientras que cuando incremento la concentración a 3 g/L, redujo a 42.2 mN/m. En el caso del presente trabajo de investigación, se detectó incrementos en la reducción de la tensión interfacial/superficial, luego de aumentar el contenido de albumina, pasando de 1.0 a 2.6% (% p/v), consiguiendo pasar de alrededor de 52 mN/m a valores por debajo de 37 mN/m. Similar efecto se observó luego de aplicar concentraciones de Caseinato de Sodio hasta 5.6% (p/v), logrando reducir la tensión a 37 mN/m.

**Figura 12.** Tensiones interfaciales/Superficiales del aire en emulsiones de aceite de aguacate con Albumina

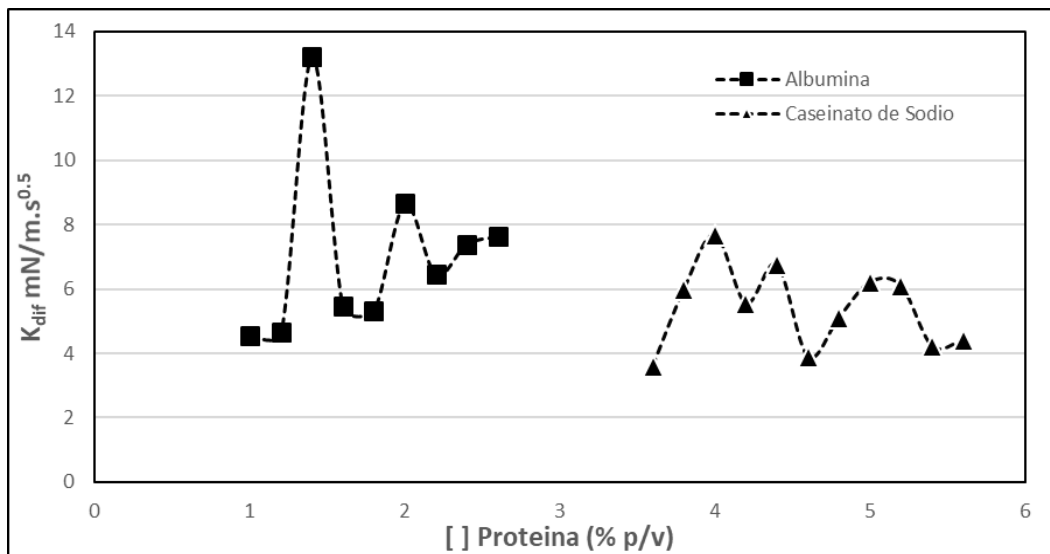


Fuente. El autor



**6.2.2** Análisis de la velocidad de difusión de emulsiones de aceite de aguacate con Caseinato de sodio y Albumina sobre la interfaz aire-emulsión. La velocidad de difusión en la interfaz aire-emulsión con respecto al Caseinato de Sodio (Grafico 2.0), permitió definir que efectivamente existe una cinética de adsorción de la proteína, específicamente al incrementar las concentraciones se observó un leve incremento proporcional al porcentaje de proteína, pasando de un  $K_{dif}$  de 3.6 a  $7.68 \text{ mN/m.s}^{0.5}$ , lo cual es un fenómeno que se vincula con la adsorción de proteínas sobre la interface (Graham y Phillips, 1979).

**Figura 13.** Velocidad de difusión ( $K_{dif}$ ) de emulsiones de aceite de Aguacate sobre la interfaz aire-emulsión

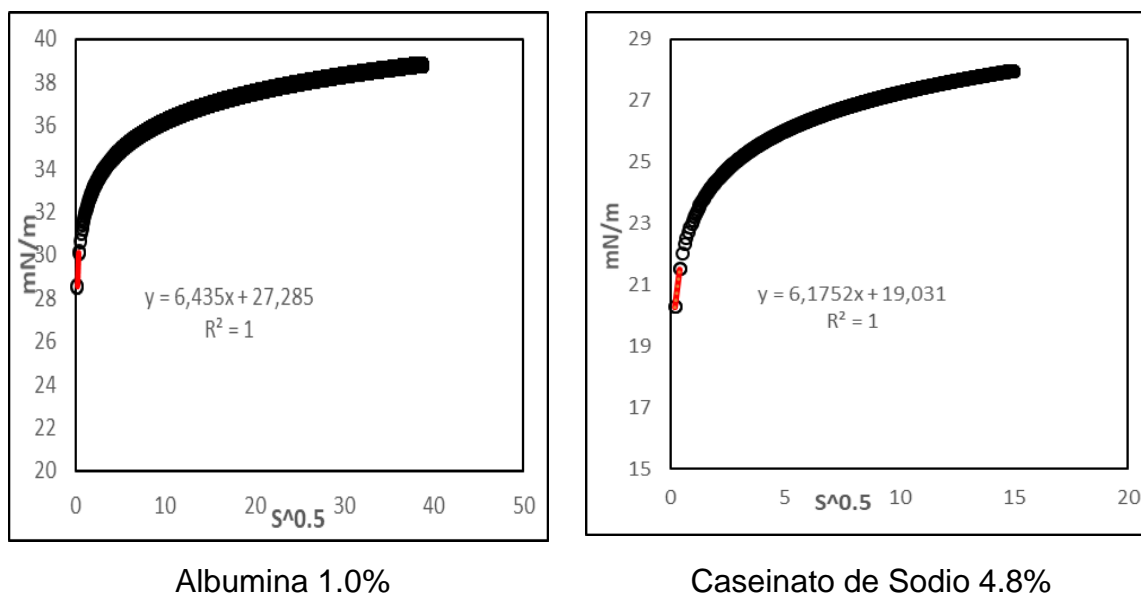


Fuente. El autor

Adicionalmente se observó que la concentración que mayor velocidad de difusión presento, fue la del Caseinato de Sodio al 4.0%, con un valor de  $7.68 \text{ mN/m.s}^{0.5}$ , mientras que la mayor velocidad alcanzada al emplear Albumina en las emulsiones, fue de  $13.22 \text{ mN/m.s}^{0.5}$  a una concentración de 1.4%. Fue posible determinar un incremento en la velocidad a medida que se aumentaba las tres primeras concentraciones en ambas proteínas (grafico 2.0), lo anterior fue corroborado en estudios llevados a cabo con proteínas de pescado (Carranza-Saavedra et al., 2016), donde se confirmó que las

velocidades de adsorción en la interface, aumentan conforme se incrementa la concentración de la proteína.

**Figura 14.** Representación gráfica del cálculo de la velocidad de difusión



Fuente. El autor

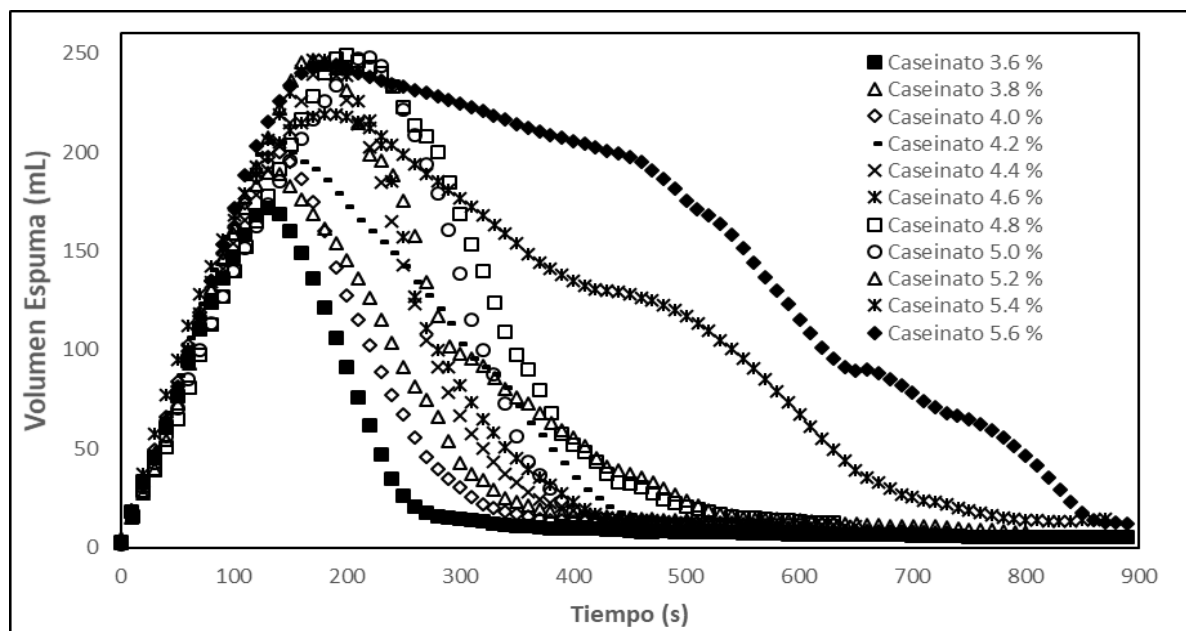
Por otro lado este estudio comprobó que la media global de velocidad de difusión correspondiente a Albumina, alcanzó una cinética de  $7.01 \text{ mN/m.s}^{0.5}$ , mayor incluso que la mostrada por el Caseinato de Sodio de  $5.42 \text{ mN/m.s}^{0.5}$ , mientras que trabajos realizados con Beta-lactoglobulina, encontraron que al modificar el punto isoeléctrico (P.I. 5.1), lograron formar capas más compactas sobre la interface, haciendo más fuerte la agregación y por tanto propiciando la formación de puentes disulfuro, que al final llegaron a alcanzar velocidades de difusión de hasta  $50 \text{ mN/m.s}$  (Corzo-Martínez, Sánchez, Moreno, Patino, & Villamiel, 2012), en tanto que al utilizar aislados de proteína de soya, se alcanzaron valores apenas de  $1.4 \text{ mN/m.s}$  (Panizzolo y Añon, 2015).

**6.2.3** Análisis de la formación de espuma de emulsiones de aceite de aguacate con Caseinato de sodio y Albumina. Las emulsiones elaboradas con Albumina, lograron obtener los valores más altos en estabilidad de espuma frente a lo obtenido por el

Caseinato de Sodio, de acuerdo con los resultados presentados en la gráfico 4.0, se observa que la mayor estabilidad en el tiempo fue lograda por la concentración de Albumina al 2.6%, alcanzando tiempos hasta de 36063.7 segundos con un máximo nivel de espuma de 243 ml, mientras que al utilizar Albumina al 1.0% se llegó a un valor de estabilidad apenas a los 1307.05 s, este último fue incluso mayor que el determinado en las emulsiones de Caseinato de Sodio (grafico 3.0) a su más alta concentración de 5.6%, la cual obtuvo un valor de alrededor de 802.59 segundos (grafico 4.0) con un máximo pico de espuma de 243.54 ml. Similarmente, otros trabajos (Miquelim *et al.*, 2010), han logrado formar espumas a partir Albumina a un pH de 4.5, llegando a generar estabilidad hasta un tiempo de 21600 segundos.

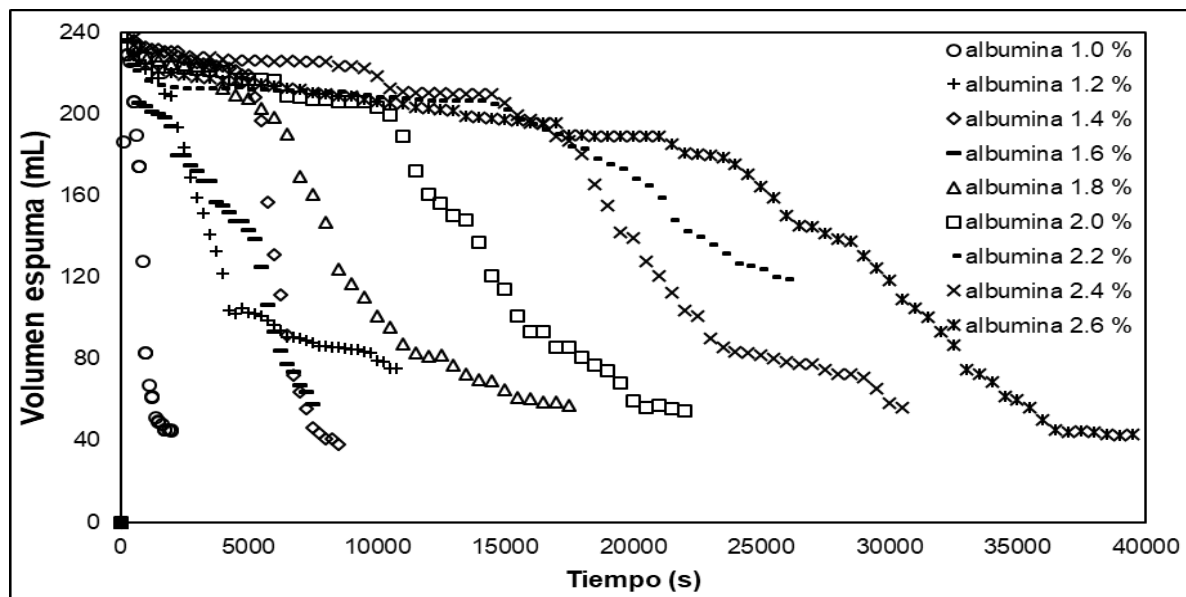
De acuerdo con los resultados obtenidos previamente, se había identificado que tanto Albumina como Caseinato de sodio, lograron ocupar el espacio superficial, reduciendo la energía libre y eventualmente la tensión interfacial/superficial, lo cual es un indicio de la capacidad de formar espumas, sin embargo durante la evaluación de la velocidad de difusión se encontró que la media global de la Albumina era mayor, lo cual es un factor importante a la hora garantizar formar espuma. Adicionalmente, la velocidad de difusión también corrobora el hecho de que las proteínas globulares como la Albumina, por tener una estructura terciaria, viajan a una velocidad diferente desde el seno de la disolución hasta la interfaz aire-emulsión, contrariamente la caseína por poseer una estructura secundaria viaja en forma de polímero lineal a una velocidad distinta (Ventureira, 2010).

**Figura 15.** Formación de espuma en emulsiones elaboradas con diferentes concentraciones de Caseinato de Sodio (% p/v)



Fuente. El autor

**Figura 16.** Formación de espuma en emulsiones elaboradas con diferentes concentraciones de Albumina (% p/v)



Fuente. El autor

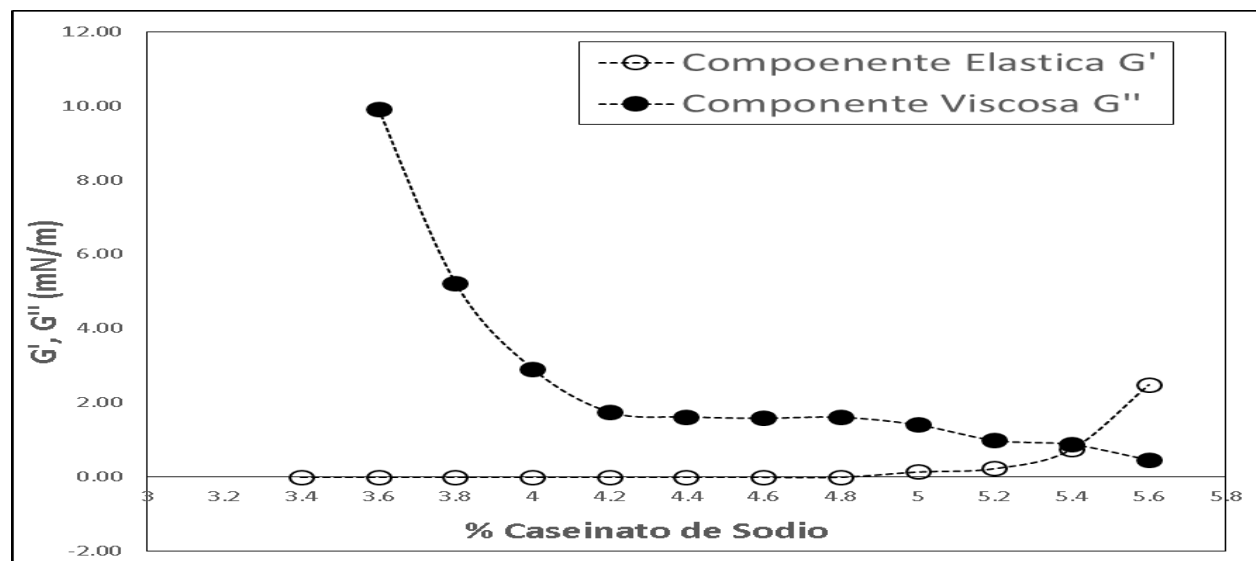
La capacidad de formación de espuma de la Albumina, también se debe que es una proteína globular con estructura terciaria, además está constituida por 585 aminoácidos con 17 puentes de disulfuro, estos últimos enlaces conforman las cisteínas, las cuales tiene un carácter marcadamente no polar, e igualmente es considerado un residuo hidrofóbico unido por puentes disulfuro, confirmando su área superficial apolar (Oyanedel, 1999). Luego de que la albumina se encuentre en contacto con un disolvente, orienta sus cadenas laterales hacia el interior de la molécula, evitando interacciones con el disolvente, mientras que las cadenas laterales de los aminoácidos polares, se localizarán en la superficie de la molécula, interactuando únicamente con el agua, y permitiendo que la proteína permanezca en la disolución (Oyanedel, 1999). Por lo anterior es posible indicar, que la estructura terciaria de la Albumina, hace que los aminoácidos apolares como la cisteína, queden expuestos hacia la interfaz aire-emulsión, mientras que los polares quedaran en contacto con el agua, propiciando de esta forma que el aire y el aminoácido a través de los puentes disulfuro sean más compatibles por su apolaridad, logrando así que la cinética de adsorción sean más dinámica en la interfaz, pues eventualmente existirá más migración y velocidad de difusión de los aminoácidos no polares hacia ese espacio. Contrariamente el Caseinato de Sodio, por poseer una estructura primaria, tiene un contenido inusual de residuos de prolina, como resultado estas proteínas son relativamente hidrofóbicas, además carecen de una estructura primaria y secundaria, bien definida, y en general solo posee un puente disulfuro entre las cisteínas que lo conforman (Calvo, 2007).

**6.2.4** Análisis de los ensayos viscoelásticos interfaciales en emulsiones de aceite de aguacate con Caseinato de sodio y Albumina. Los análisis de varianza (ANOVA) demostraron una influencia estadísticamente significativa ( $P < 0.05$ ) de los incrementos en las concentraciones de las proteínas sobre el módulo de almacenamiento  $G'$  y el de pérdida  $G''$ . Esto se debe a la continua acumulación de moléculas con carácter anfifílico sobre la interface, pues al ser absorbidas y ubicarse en la interfaz, contribuyen a la modificación mecánica de la masa (MacRitchie y Fletcher, 1990). Como se observa en el

grafico 5.0, la componente  $G''$  predominó significativamente sobre el módulo de almacenamiento  $G'$  al utilizar Caseinato de Sodio en emulsiones de aceite de aguacate.

Los resultados viscoelásticos revelaron una comportamiento más elástico  $G'$  en las emulsiones elaboradas con Albumina (Grafico 6.0), esto responde a los resultados presentados previamente donde los valores de estabilidad de espuma fueron mejores para Albumina, debido a que los puentes de disulfuro que conforman la estructuran, logran reorganizarse en la interfaz al ser de más afinidad hidrofóbica con el aire, eventualmente hace que se promueva una adsorción más dinámica de proteína hacia la interface aire-emulsión, mejorando la reducción de la energía libre, consiguiendo así ocupar el espacio superficial que queda a disposición en la llame de la burbuja, de tal manera que se recrea una interfaz solida con tendencia mecánica hacia la conformación del solido ideal que obedece a la ley de Hooke (Mucci, Sánchez, Criado, & Bianchi, 2003), por lo cual este comportamiento solido se ve reflejado en las propiedades viscoelásticas con la representación del predominio del módulo de almacenamiento o componente elástica  $G'$ .

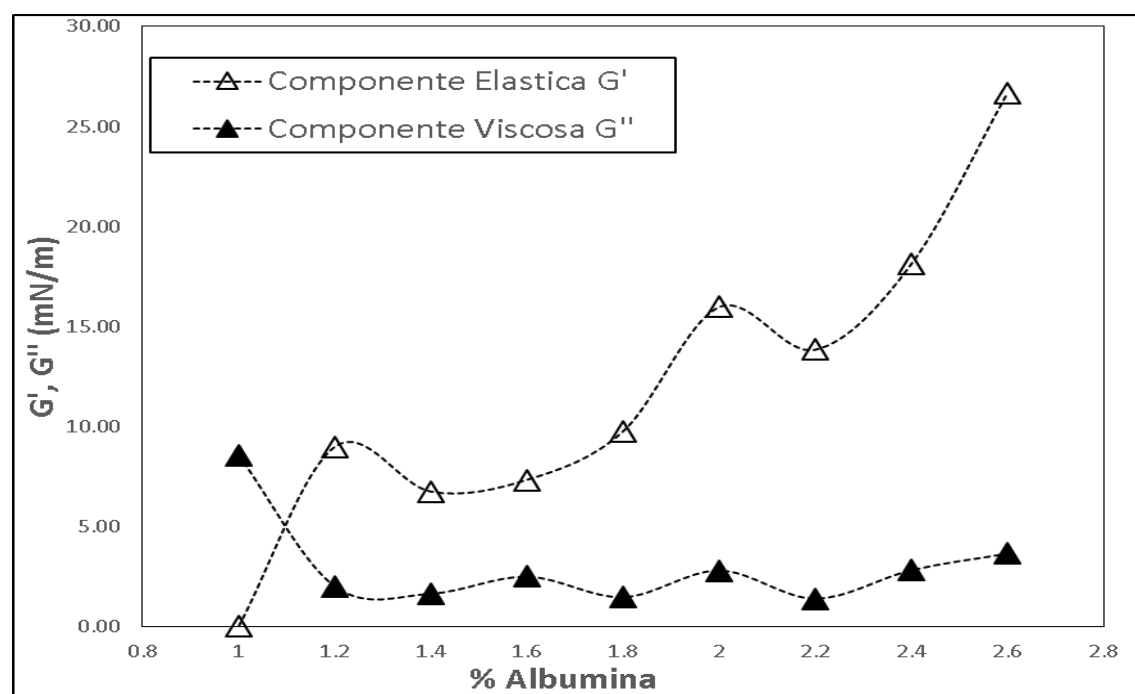
**Figura 17.** Propiedades viscoelástica de emulsiones de Aceite de Aguacate elaboradas con Caseinato de Sodio (% p/v)



Fuente. El autor

A diferencia del comportamiento elástico  $G'$ , observado en las emulsiones de Aceite de aguacate con Albumina, las elaboradas con Caseinato de Sodio mostraron un comportamiento viscoso según el módulo de pérdida  $G''$ , representando un fluido líquido sobre la interfaz aire-emulsión, recreando de esta manera una lame más líquida con tendencia hacia el líquido ideal de Newton. Autores también han señalado que el modulo elástico  $G'$  predomina al realizar un espectro mecánico en materiales que poseen la presencia de burbujas (Gorlier *et al.*, 2017), es decir las espumas se comportan como un sólido elástico, dentro de la región lineal viscoelástica (Jimenez-Junca, Gumy, Sher, y Niranjana, 2011).

**Figura 18.** Propiedades viscoelástica de emulsiones de Aceite de Aguacate elaboradas con Albumina (% p/v)

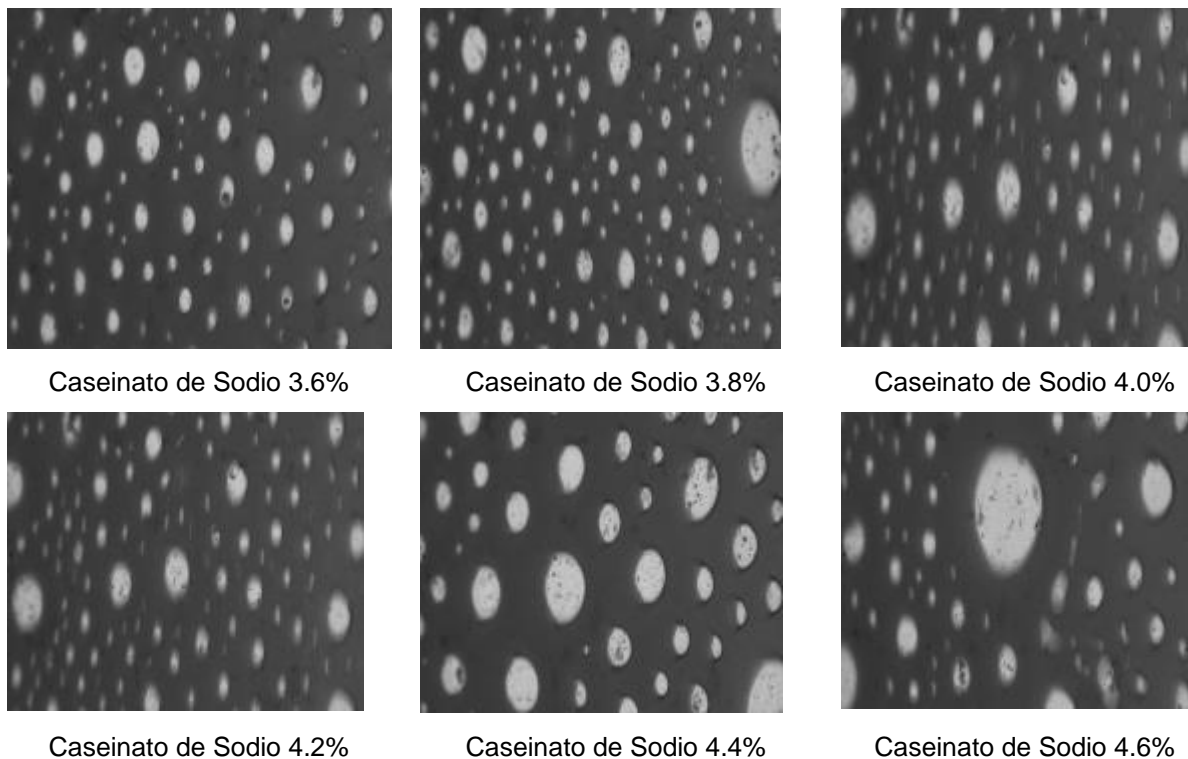


Fuente. El autor

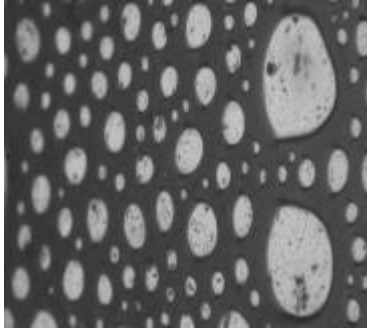
**6.2.5** Imágenes de las burbujas formadas por las emulsiones de aceite de aguacate con Caseinato de sodio y Albumina. De acuerdo con las imágenes que se observan en el cuadro 3.0, es posible afirmar que las burbujas que se encuentran en los espacios

blancos, están rodeadas por una solución líquida (espacio gris) que corresponde principalmente a la emulsión elaborada con Caseinato de Sodio a diferentes concentraciones, también se observa que estos espacios grises ocupan un espacio considerable en cada una de las microfotografías, mostrando una baja capacidad para retener aire por parte de la emulsión. Sin embargo a medida que se incrementa la concentración de la proteína, los espacios en blanco donde se encuentra el aire, empiezan a tomar tamaños más grandes, demostrando una leve capacidad de retención del gas a concentraciones altas.

**Figura 19.** Formación de burbujas a partir de emulsiones de Aceite de Aguacate con Caseinato de Sodio.



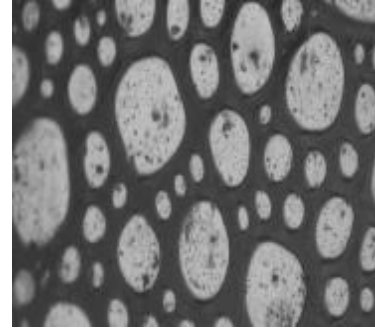




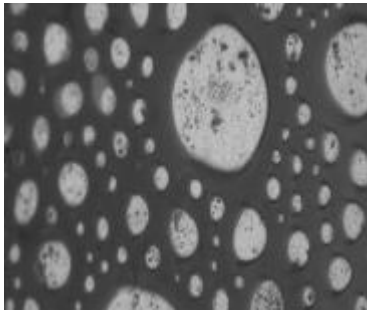
Caseinato de Sodio 4.8%



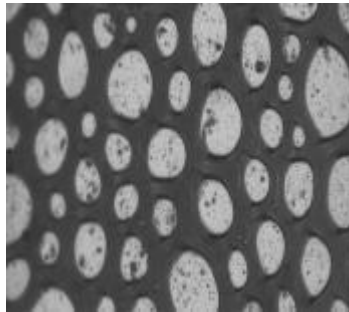
Caseinato de Sodio 5.0%



Caseinato de Sodio 5.2%



Caseinato de Sodio 5.4%



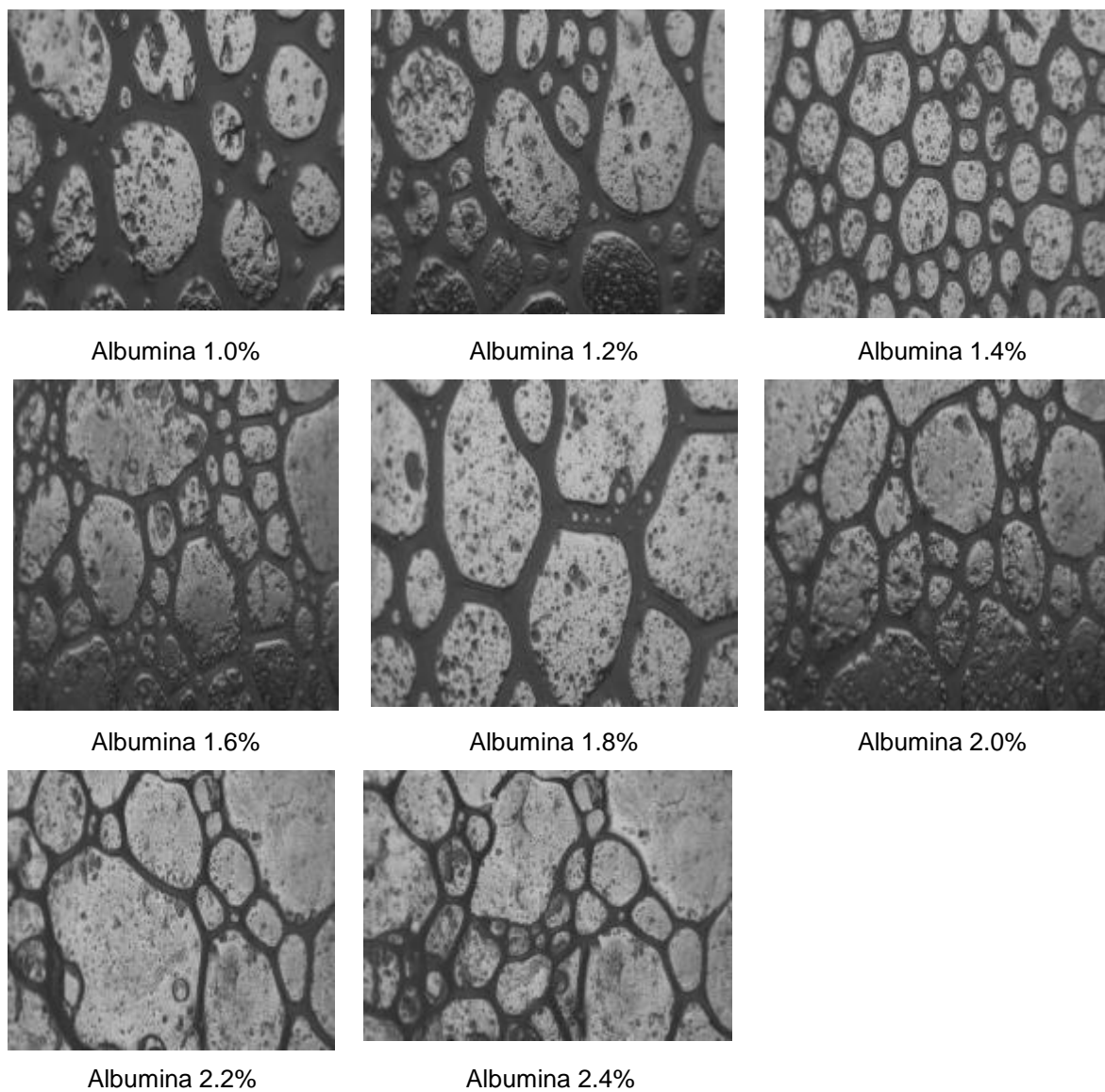
Caseinato de Sodio 5.6%

Fuente. El autor

A diferencia de lo anterior, en el cuadro 4.0, se logra observar burbujas más grandes y estructuralmente organizadas, las cuales corresponden a las obtenidas a partir de emulsiones con Albumina, además en las microfotografías no se aprecian tan cubiertas de líquido sino que poseen más presencia de aire, gracias a su alta capacidad de retención de gas. Si se observa especialmente la lamella, esta no está tan cubierta de líquido, e igualmente se aprecia más delgada y compacta es decir sólida, lo cual correspondería hacia la tendencia de sólido ideal de Hooke, con una respuesta instantánea frente a la deformación, recreando un comportamiento elástico.

Mientras que las emulsiones con Caseinato de Sodio, tienen un comportamiento más fluido que representa el líquido ideal de Newton, respondiendo a la deformación de forma retardada y recreando un comportamiento más viscoso. Lo anterior fue ciertamente corroborado en los ensayos viscoelásticos interfaciales.

**Figura 20.** Formación de burbujas a partir de emulsiones de Aceite de Aguacate con Albumina



Fuente. El autor

Otros estudios han señalado de la influencia de factores externos como el estrés iónico, las concentraciones y el tipo de agentes utilizados sobre la formación de espuma, estos a su vez inciden sobre parámetros como el tamaño y distribución de las burbujas, que eventualmente son condicionantes de la estabilidad de la espuma (K. Martínez y Sanchez, 2016; K. D. Martínez y Sanchez, 2014; Schmidt et al., 2010).

**6.2.6** Análisis de varianza de las tensiones interfaciales/superficiales y la estabilidad de la espuma en emulsiones de aceite de aguacate con Caseinato de sodio y Albumina. De acuerdo con los resultados obtenidos (Tabla 10 y 11.), se observó que aumentar las concentraciones de proteínas, permite disminuir proporcionalmente las tensiones superficiales en la interfaz aire/emulsión, según el análisis de varianza (ANOVA), el incremento del Caseinato y la Albumina, influyen significativamente ( $P < 0.05$ ) sobre la reducción de la tensión y simultáneamente sobre el incremento en la estabilidad y formación de la espuma, estableciendo de igual manera una presunta relación entre los descensos en la tensión y los incrementos en la estabilidad de la espuma. Adicionalmente la prueba de múltiple rangos (LSD) demostró que existen diferencias entre cada una de las medias del ensayo de estabilidad de la espuma. La relación entre las caídas de la tensión superficial y los incrementos en la estabilidad de la espuma, se debe gracias a la acción surfactante de las proteínas, las cuales son capaces de ubicarse en el área superficial para luego vencer la energía libre que se almacena en la interface, es decir logran reducir la tensión superficial gracias a la estabilización termodinámica del sistema (Perez, 2012), eventualmente conformarán una bicapa de moléculas anfifílicas absorbidas alrededor de la superficie de la burbuja (Valderrama, 2006), es así que a medida que se incrementan los contenidos de las proteínas sobre la interfaz, tienden a depositarse más moléculas anfifílicas alrededor de la misma, las cuales ayudan a capturar más aire e incrementan y fortalecen la estabilidad de la burbuja en el tiempo.

Tal como se observa en la tabla 10, la menor concentración de Caseinato (3.6% p/v), alcanzo apenas una reducción de la tensión de 47.66 mN/m, mientras que al utilizar el mayor contenido (5.6 % p/v) se logró bajar hasta 36.37 mN/m, paralelamente a esta tensión se alcanzó el máximo valor de estabilidad de la espuma (802.59 segundos). Al emplear la mínima concentración de Albumina (1.0 % p/v) se llegó a una tensión de 51.05 mN/m, en tanto que al incrementar la concentración hasta 2.6% (p/v), fue posible reducir la tensión hasta 36.56 mN/m, al mismo tiempo estas condiciones lograron el mayor nivel de estabilidad en la espuma, llegando a 36063.67 s.

**Tabla 9.** Tensiones superficiales y estabilidad de espuma en emulsiones de aceite de aguacate con Caseinato de sodio

<b>Concentraciones de Caseinato de Sodio (% p/v)</b>	<b>Tensión interfacial/Superficial mN/M</b>	<b>Estabilidad de espuma (Segundos)</b>	<b>Formación de espuma (ml)</b>
3.6	47.66 <sup>k</sup>	226.61 <sup>a</sup>	174.10 <sup>a</sup>
3.8	46.00 <sup>h</sup>	289.10 <sup>b</sup>	191.76 <sup>b</sup>
4.0	45.74 <sup>e</sup>	267.07 <sup>c</sup>	202.15 <sup>c</sup>
4.2	44.77 <sup>j</sup>	384.57 <sup>d</sup>	207.17 <sup>d</sup>
4.4	45.85 <sup>f</sup>	322.61 <sup>e</sup>	250.77 <sup>e</sup>
4.6	44.76 <sup>d</sup>	339.06 <sup>f</sup>	250.26 <sup>f</sup>
4.8	45.89 <sup>g</sup>	399.79 <sup>g</sup>	250.99 <sup>f</sup>
5.0	46.01 <sup>i</sup>	351.13 <sup>h</sup>	251.22 <sup>f</sup>
5.2	38.89 <sup>c</sup>	414.81 <sup>i</sup>	247.76v <sup>f</sup>
5.4	38.60 <sup>b</sup>	619.63 <sup>j</sup>	220.0 <sup>f</sup>
5.6	36.37 <sup>a</sup>	802.59 <sup>k</sup>	243.54 <sup>f</sup>

Fuente. El autor

**Tabla 10.** Tensiones superficiales y estabilidad de espuma en emulsiones de aceite de aguacate con Caseinato de sodio

<b>Concentraciones de Albumina (% p/v)</b>	<b>Tensión interfacial/Superficial mN/M</b>	<b>Estabilidad de espuma (Segundos)</b>	<b>Formación de espuma (ml)</b>
1.0	51.05 <sup>a</sup>	1307.05 <sup>a</sup>	237.05 <sup>b</sup>
1.2	50.76 <sup>b</sup>	10901.8 <sup>b</sup>	245.13 <sup>c</sup>
1.4	45.89 <sup>c</sup>	7399.31 <sup>c</sup>	251.2 <sup>e</sup>
1.6	41.33 <sup>d</sup>	7499.85 <sup>d</sup>	250.95 <sup>e</sup>
1.8	41.51 <sup>e</sup>	17767.0 <sup>e</sup>	252.31 <sup>f</sup>
2.0	41.02 <sup>f</sup>	21475.9 <sup>f</sup>	251.10 <sup>e</sup>

<b>2.2</b>	40.16 <sup>g</sup>	26282.6 <sup>g</sup>	235.00 <sup>a</sup>
<b>2.4</b>	39.28 <sup>h</sup>	30722.3 <sup>h</sup>	251.40 <sup>e</sup>
<b>2.6</b>	36.56 <sup>i</sup>	36063.7 <sup>i</sup>	247.01 <sup>d</sup>

Fuente. El autor

### 6.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE EMULSIONES DE ACEITE DE AGUACATE, ELABORADAS CON PROTEÍNAS Y MEZCLAS DE HIDROCOLOIDES

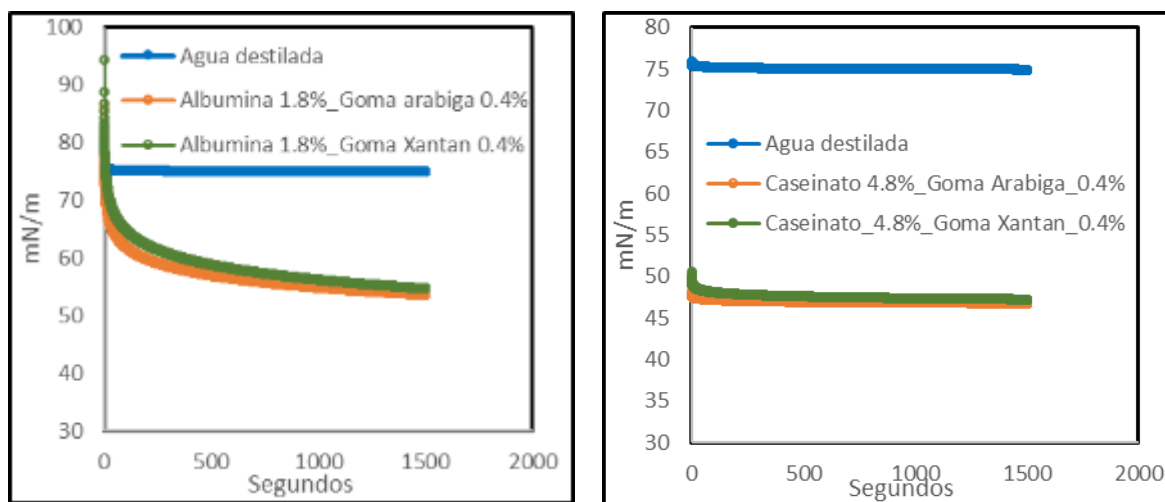
**6.3.1** Análisis de la tensión interfacial del aire con emulsiones de aceite de aguacate Caseinato de sodio, Albumina y mezclas de hidrocoloides. Los ensayos realizados de mezclas de proteínas con hidrocoloides, demostraron la disminución en la tensión interfacial/superficial. Al emplear albumina al 1.8% junto con goma arabia y goma xantan, pasaron de una tensión con un valor cercano de 75 mN/m a uno de alrededor de 55 mN/m, mientras que los ensayos con Caseinato de Sodio al 4.8% con los polisacáridos, lograron reducir la tensión interfacial/superficial a un valor cercano de 47 mN/m lo cual fue significativo (Cuadro 5.0).

En comparación con los resultados obtenidos al emplear emulsiones con Caseinato de Sodio, las mezclas con hidrocoloides, mostraron reducir igualmente la tensión interfacial a valores previamente obtenidos por la proteína (47 mN/m), mientras que al emplear las mezclas de albumina e hidrocoloides, no se alcanzaron valores bajos de tensión interfacial/superficial, pues de acuerdo con los resultados, se identificaron tensiones de alrededor de 55 mN/m. Contrariamente los estudios previos han demostrado que luego de mezclar proteínas globulares con pectinas, decrece drásticamente la tensión interfacial, logrando alcanzar valores hasta de 45.5 mN/m.

La reducción de la tensión interfacial por parte de la mezcla de proteínas e hidrocoloides, indica que pueden llegar a garantizar la estabilidad termodinámica de las espumas, pues se ha resaltado que las propiedades funcionales de las proteínas, tales como las espumantes y emulsificantes, se ven afectadas por su interacción con los hidrocoloides

(Dickinson, 2003). Otros estudios llevados a cabo con la mezcla de albumina y carragenina, permitieron disminuir la tensión superficial de 70 a 43 mN/m, logrando mayor reducción que al probar con goma guar y xantan(Miquelim *et al.*, 2010). Normalmente la presencia de proteínas junto con la de polisacáridos, promueve interacciones hidrofóbicas, puentes de hidrogeno y electrostáticas, especialmente la goma xantan propicia la estabilidad debido a las cadenas rígidas que conforma al entrecruzarse con otras moléculas (Narchi, Vial, & Djelveh, 2009), haciendo que las mezclas adquieran más viscosidad.

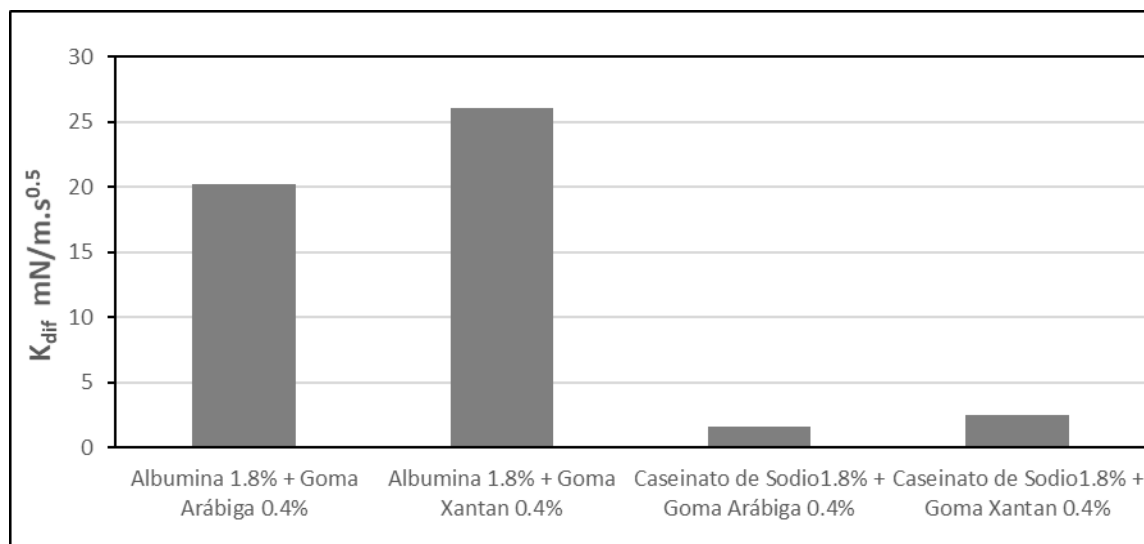
**Figura 21.** Tensiones interfaciales con mezclas de proteínas e hidrocoloides



Fuente. El autor

**6.3.2.** Análisis de la velocidad de difusión sobre la interfaz aire-emulsión de emulsiones de aceite de aguacate con proteínas y mezclas de hidrocoloides. Los resultados obtenidos de las proteínas junto con hidrocoloides, mostraron una alta velocidad de difusión de la mezcla de los polímeros hacia la interface, especialmente se observó valores altos al mezclar en las emulsiones Albumina (1.8 % p/v) y Goma Xantan (0.4% p/v), llegando a alcanzar un cambio cinético de hasta 26.09 mN/m.s<sup>0.5</sup>, en tanto que al utilizar goma arábica como polisacárido se observaron tasas de cambio de 20.18 mN/m

**Figura 22.** Velocidad de difusión ( $K_{dif}$ ) de mezclas de proteínas con hidrocoloides en emulsiones de Aceite de Aguacate



Fuente. El autor

De acuerdo con reportes actuales (Pérez, Martínez, Sánchez, y Patino, 2017), se ha señalado que la presencia de una proteína y un biopolímero, mejoran la habilidad de penetrar la interface, esta acción conjunta promueve la agregación de la proteína, es decir, permite la reorganización de la estructura molecular, lo cual es inducido por el polisacárido, repercutiendo en la hidrofobicidad y eventualmente favoreciendo la cinética de adsorción hacia la interface, tal hecho se observó al mezclar diluciones de proteína de suero de leche con mezclas de metocelulosa (HPMC) grado alimentario, llegando a obtener valores de velocidad de difusión de hasta 90.83 mN/m.s<sup>0.5</sup>.

Esta tendencia también se debe a que las proteínas en la interface normalmente sufren un cambio en su conformación, en algunas ocasiones muy drástico y cuando son globulares como la Albumina, parecen tener mayor retención sobre la interfaz aire-agua, mientras que las proteínas de estructura secundaria como la Caseína tienden a absorberse tan solo como un polímero lineal (Ventureira, 2010). De hecho, los valores de velocidad de difusión del Caseinato de Sodio con mezclas de hidrocoloides, presentaron los valores más bajos, incluso inferiores a lo presentado por la Albumina y

mezclas de gomas como se observa en el grafico 7.0, encontrando valores mínimos de  $1.61 \text{ mN/m.s}^{0.5}$ . Paralelamente, otros trabajos han determinado velocidades de difusión en aislados de proteínas del suero lácteo, llegando a obtener valores cercanos de  $26.5 \text{ mN/m.s}^{0.5}$ , en tanto que al realizar mezclas con carragenina, se alcanzaron valores superiores a  $29 \text{ mN/m.s}^{0.5}$  (Perez, 2012), estas velocidades fueron muy similares a las encontradas al emplear Albumina y mezclas con hidrocoloides.

En resumen la velocidad de difusión, especialmente la obtenida por la Albumina es un indicio frente a la oportunidad de generar espumas estables, pues se demostró la adsorción de ambas proteína en la interfaz aire-emulsión, es tan notable este fenómeno, que se ha reseñado que la adsorción inicial de la proteína sobre la interfaz aire-agua, es el factor más importante en la formación de espumas (Rodríguez Patino, Rodríguez Niño, y Carrera Sánchez, 2007).

**6.3.3** Análisis de la formación de espuma en emulsiones de aceite de aguacate con Caseinato de sodio, Albumina y Mezclas con hidrocoloides. Por otro lado, al mezclar la albumina al 1.8% (p/v) con los hidrocoloides, no se obtuvieron óptimos resultados tal como se hallaron al emplear solo la proteína a esa concentración, pues se redujo la estabilidad de la espuma, pasando de un tiempo de 17500 segundos a una de 4496 s con goma xantan y 5203.07 s al emplear goma arábica (Grafico 8.0). Contrariamente el Caseinato de Sodio a una concentración de 4.8% (p/v) al mezclarse con la goma xantan al 0.4% (p/v), mejoró significativamente la estabilidad de la espuma, incrementando el tiempo de 430 segundos a un valor cercano de 5647.58 s al estar en contacto con el hidrocoloide goma xantane, lo cual significa que el polisacárido potencializa considerablemente las propiedades de formación de espuma, en tanto que al estar en contacto el Caseinato de Sodio al 4.8% (p/v) con goma arábica, incremento levemente la estabilidad, pasando de 430 s hasta llegar a cerca de 1110.63 segundos, logrando mejorar igualmente la funcionalidad de la proteína. Lo anterior también fue corroborado, luego de realizar ensayos con la proteína del suero de leche, observando que no se obtuvo una espuma estable al utilizar únicamente la disolución proteica, contrariamente



al mezclar con concentraciones de methocelulosa, los incrementos en la formación de espuma fueron notables (Pérez et al., 2017).

La potencialización del Caseinato de Sodio puede deberse a que estas proteínas poseen la presencia de una zona con carga neta positiva entre los aminoácidos 20 y 115, al estar cargada positivamente, permite la interacción de la caseína con hidrocoloides que mantienen una carga negativa (Calvo, 2007), también se ha explicado, que ciertos polisacáridos como la carragenina, se asocian con las miscelas de caseína a través de interacciones electrostáticas que se dan entre las cargas negativas de los grupo que poseen puentes disulfuro y las cargas positivas que se dan en la región de unión de la carragenina (Depypere, Verbeken, Torres, y Dewettinck, 2009), esto confirma que la mezcla de proteínas con polisacáridos es una opción considerable que permite mejorar la funcionalidad de la estructura, pues para efectos de este trabajo, optimizo el proceso de difusión hacia la interface.

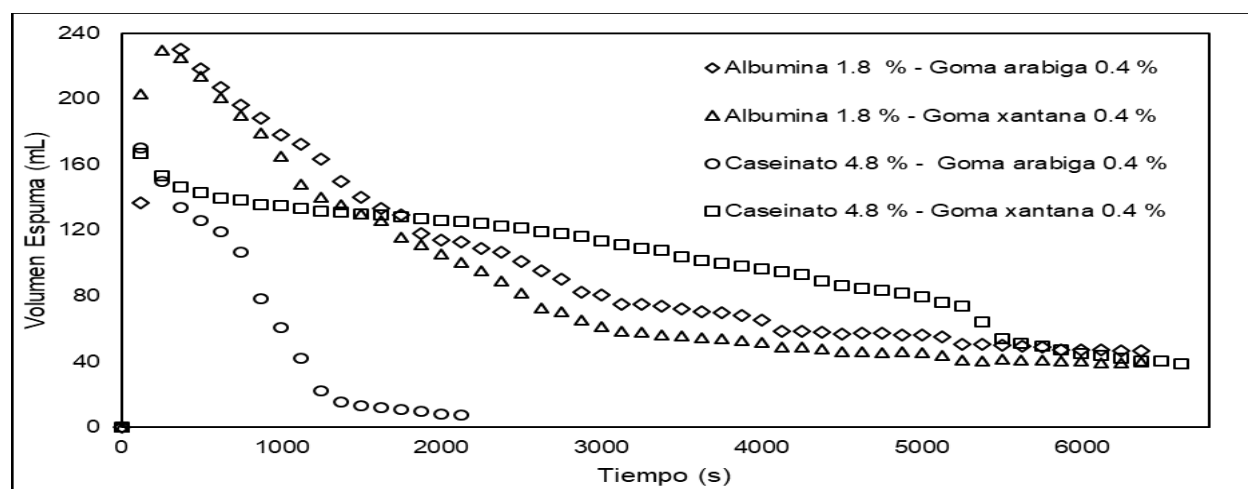
Por el lado de la Albumina, se han referenciado resultados similares a los obtenidos por el presente trabajo, pues luego de aplicar goma xantan en diluciones de proteína, decreció la estabilidad de la espuma, pasando de 18 a 6 horas (Miquelim *et al.*, 2010). Tal como se explicó anteriormente, se ha demostrado que la caseína posee una extensiva región de 95 residuos de aminoácidos, de los cuales tan solo uno está en forma negativa, mientras que 13 a pH neutro se encuentran cargados positivamente, autores sugieren que precisamente esta región, podría ser la responsable de las interacciones electrostáticas entre la caseína y el polisacárido que naturalmente estará cargado de forma negativa (Dalglish y Morris, 1988; Spagnuolo, Dalglish, Goff, y Morris, 2005; Vega, Dalglish, y Goff, 2005).

Esta interacción está dada principalmente por la interacción entre una proteína y el polisacárido, el cual origina el fenómeno de coacervación, es así que cuando se conforman los coacervados por las interacciones electrostáticas de las cargas opuestas, estos inmediatamente tienen una preferencia por transportarse y ubicarse sobre la

interface, simultáneamente provocan una drástica caída en la tensión superficial/interfacial y un cambio en las propiedades reológicas interfaciales de la superficie, estos cambios provocados en la interface, permiten que más coacervados se absorban sobre la interface (Miquelim et al., 2010), logrando que más moléculas logren capturar y estabilizar mayor cantidad de aire, generando mayor estabilidad de las espumas.

Es así que el Caseinato logra potencializar la funcionalidad para formar espuma al estar en contacto con hidrocoloides. Contrariamente la Albumina que en su estado natural se encuentra cargada negativamente, y que al mezclarse tanto con la goma xantan como con la arábica, las cuales también poseen un carácter negativo, ciertamente producirán una inhibición de las interacciones electrostáticas y promoverán las repulsivas, que por el contrario no disminuyen la tensión superficial, sino que de hecho conllevan al incremento de la misma, por lo cual se deduce que no hay cambios mecánicos en la interface, tampoco habrá una dinámica de acumulación de las moléculas sobre la interface que contribuyen a la captura de aire y por consiguiente tampoco afectaran la capacidad por aumentar la estabilidad de la espuma (Miquelim et al., 2010).

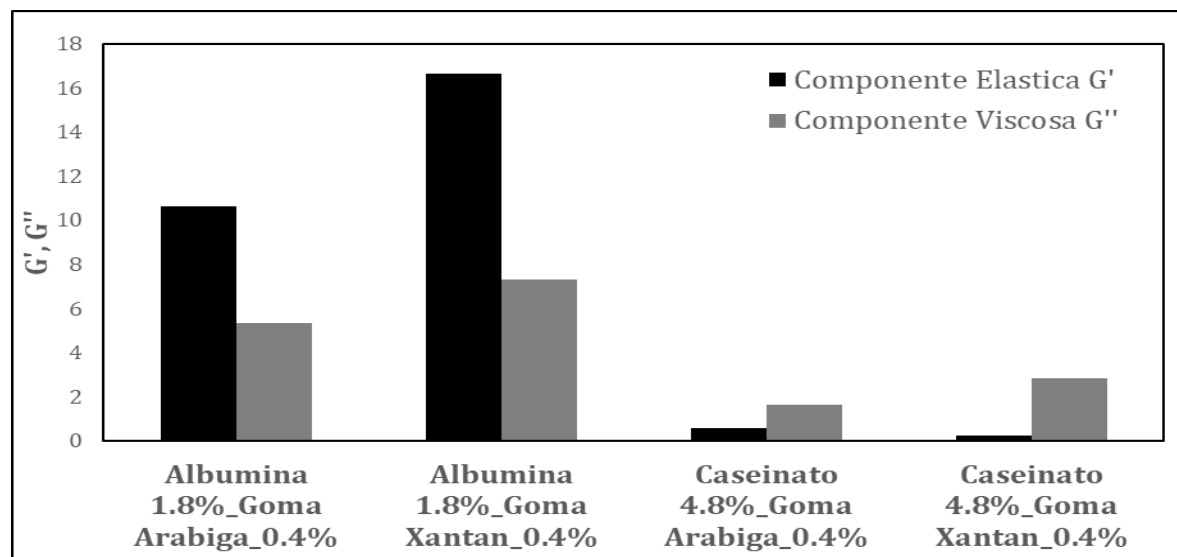
**Figura 23.** Formación de espuma en emulsiones elaboradas con diferentes concentraciones de proteína (% p/v) e hidrocoloides (% p/v)



Fuente. El autor

**6.3.4** Análisis de los ensayos viscoelásticos interfaciales de emulsiones de aceite de aguacate con proteínas y mezclas de hidrocoloides. En el grafico 9.0, se observó un comportamiento elástico  $G'$ , al utilizar Albumina con mezclas de hidrocoloides, sin embargo también aumento la componente viscosa  $G''$ , reflejándose en una caída de la estabilidad de la espuma al emplear estas mezclas. Por otro lado, los resultados con Caseinato de Sodio demostraron un leve aumento en el módulo de almacenamiento  $G'$  al realizar la mezcla con los hidrocoloides, efecto que potencializo drásticamente la proteína, haciendo que se mejorara la formación y estabilidad de la espuma. No obstante, el módulo de pérdida  $G''$  fue el predominante en las mezclas de Caseinato de Sodio e hidrocoloides, esto se debe a que la mayoría de gomas tienden a espesar y a generar viscosidad, especialmente la Xantan, esto a su vez se explica, por la rigidez de las cadenas que tiende a formar y por la debilidad entre los enlaces de hidrogeno (Narchi, Vial, y Djelveh, 2009). Estudios en espumas, también han reportado el incremento en la componente elástica  $G'$ , al adicionar pectina de bajo methoxilo en disoluciones de proteína del suero de leche. Cabe resaltar que previo a la incorporación de los hidrocoloides, la componente de almacenamiento  $G'$  para la proteína Caseinato de sodio, registró un valor  $G'$  de 0.00 mN/m, mientras que al incorporar la Goma Arábica y Goma Xantan, se alcanzaron valores en el módulo elástico  $G'$  de 0.59 y 0.23 mN/m, lo cual supone un cambio en las propiedades mecánicas de la interface, ya que como se observa en el grafico 5.0, se evidenciaron cambios inicialmente en la tensión superficial que luego afectaron las características reológicas interfaciales de la interface, esto se debe al presunto fenómeno de coacervación que se origina entre las regiones de carga positiva de la proteína (Caseinato de Sodio) y la respectiva interacción electrostática con las gomas que se encuentran cargadas negativamente, propiciando un absorción de las moléculas coacervadas sobre la interface, generando cambios en las propiedades mecánicas de las espumas.

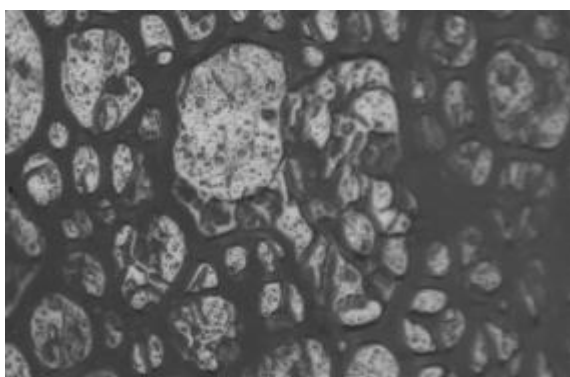
**Figura 24.** Propiedades viscoelástica de emulsiones de Aceite de Aguacate elaboradas con Albumina (% p/v)



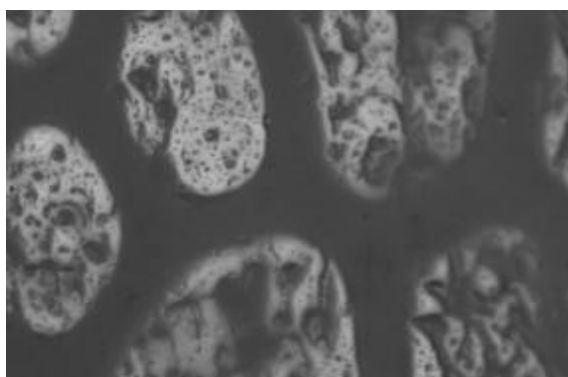
Fuente. El autor

**6.3.5** Imágenes de las burbujas formadas por las emulsiones de aceite de aguacate con mezcla de proteínas e hidrocoloides. Finalmente en el cuadro 6.0, en las microfotografías se logró apreciar lamellas de mayor grosor, esto se debió posiblemente, a que los hidrocoloides aportan espesor y viscosidad a los medios, pues conforman estructuras de cadenas rígidas que absorben buena cantidad de agua (Narchi et al., 2009). La retención de más líquido en la lamella, soportado por la adición de los hidrocoloides, promueve la retención del gas al interior de la burbuja (K. Martínez & Sanchez, 2016), de acuerdo con reportes actuales, en gran parte de los sistemas, se genera una buena estabilidad siempre y cuando se garantice una mayor incorporación de líquido, generando tamaños y distribuciones homogéneos (K. D. Martínez & Sanchez, 2014).

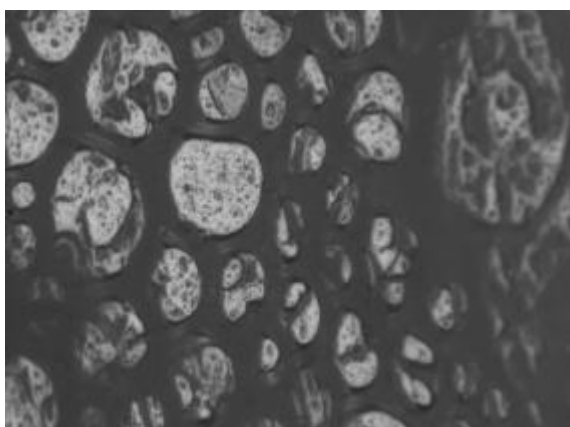
**Figura 25.** Formación de burbujas a partir de emulsiones de Aceite de Aguacate con Albumina



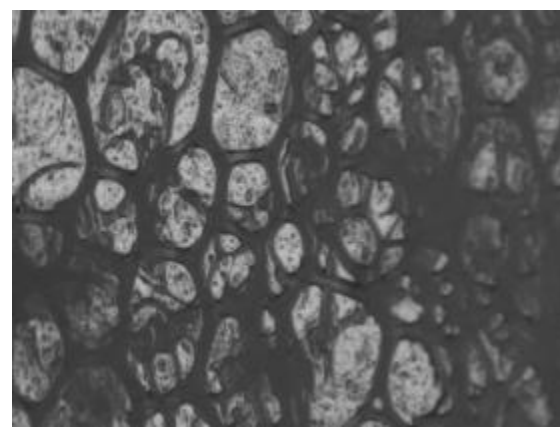
Albumina 1.8% con Goma Árábica 0.4%



Albumina 1.8% con Goma Xantan 0.4%



Caseinato de Sodio 4.8% con Goma Árábica  
0.4%



Caseinato de Sodio 4.8% con Goma Xantan  
0.4%

Fuente. El autor

De acuerdo con las imágenes presentadas en el cuadro 6.0 y en base a los análisis anteriores, es posible identificar que el significativo espesor, grosor y la alta densidad presente en las lamellas de las espumas, se debe posiblemente a los fenómenos de coacervación que ocurren entre el Caseinato de Sodio y las gomas, pues las cargas positivas de la proteína junto con las cargas negativas de los polisacáridos, generan interacciones electrostáticas, las cuales dan origen a los coacervados, que eventualmente se reubican sobre la interface, haciendo posible cambios en la tensión y en las propiedades reológicas interfaciales (Miquelim et al., 2010), por tanto promueve

una dinámica constante de acumulación de moléculas entre ellas las proteínas y los polisacáridos que viajaran hacia la interfaz, y se encargarán de estabilizar termodinámicamente el sistema y reconfigurarse alrededor de la burbuja, de igual manera hacen ver una lamela congestionada de moléculas anfifílicas capaces de estabilizar la espuma.

## 7. CONCLUSIONES

Las emulsiones de Aceite de Aguacate, elaboradas a partir de Caseinato de Sodio y Albumina, lograron formar y estabilizar espumas, gracias a la acción tensioactiva de las proteínas, sin embargo el estudio logro demostrar una mayor capacidad de formación de espuma por parte de la Albumina gracias a que en su estructura química se encuentran puentes disulfuro que permiten asociarse fácilmente con estructuras apolares y al mismo tiempo le permite migrar rápidamente hacia la interfaz, mientras que en el Caseinato se observó una baja capacidad de formación de espuma. Sin embargo esta proteína logro potencializar su capacidad de formación de espuma, luego de incorporar hidrocoloides como la goma arábica y xantan, pues una vez conformadas las interacciones electrostáticas entre estos por la diferencias de cargas netas, lograron incidir sobre las propiedades reológicas interfaciales, y consecuentemente sobre el incremento en la estabilidad de las espumas.

De esta manera el Caseinato de Sodio, surge como una alternativa en los procesos industriales, que buscan la reducción de costos y el consumo de energía, pues las mezcla con hidrocoloides potencializa significativamente sus posibilidades de estabilización y generación de espumas. También fue posible identificar que la formación y estabilidad de la espuma en emulsiones de aceite de aguacate, estará condicionada por las características mecánicas de las espumas, pues para efectos de este trabajo de investigación, se determinó un comportamiento predominantemente elástico en las burbujas con mayor estabilidad en el tiempo. Igualmente, factores como la disminución de la tensión superficial/interfacial, generan certeza y garantía en cuanto a la conformación y la estabilidad de la espuma en el tiempo.

## EXPECTATIVAS Y RECOMENDACIONES

- Realizar ensayos correspondientes a los cambios de las cargas electrónicas proveerá más información sobre el comportamiento de las espumas a diferente pH.
- Realizar ensayos correspondientes a determinar la velocidad de penetración de la proteína en la interfaz aire-emulsión, permitirá entender el mecanismo de adsorción de la proteínas sobre la interface.
- Es necesario profundizar en el tamaño y distribución de las burbujas durante el proceso de formación de espuma, esto contribuirá con la optimización de la estabilidad y formación de espuma.
- Incorporar al estudio variable como la temperatura, generará nueva información frente al comportamiento de las emulsiones de Aceite de aguacate y su capacidad de formar y estabilizar espuma.



## REFERENCIAS

- Adhikari, B., Howes, T., Bhandari, B., & Langrish, T. (2009). Effect of addition of proteins on the production of amorphous sucrose powder through spray drying. *Journal of Food Engineering*, 94(2), 144-153.
- Aguilera, J. M., & Lillford, P. J. (2007). *Food materials science: principles and practice*: Springer Science & Business Media.
- Alvarez Cerimedo, M. S. (2013). *Estabilidad de emulsiones y encapsulación de aceites con propiedades nutraceuticas*. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires.
- Arbolea, J.-C., Ridout, M. J., & Wilde, P. J. (2009). Rheological behaviour of aerated palm kernel oil/water emulsions. *Food hydrocolloids*, 23(5), 1358-1365.
- Bazmi, A., Duquenoy, A., & Relkin, P. (2007). Aeration of low fat dairy emulsions: Effects of saturated–unsaturated triglycerides. *International dairy journal*, 17(9), 1021-1027.
- BerGer, K. G. (2007). Trans-free fats with the products of the oil palm—a selective review. *Czech J. Food Sci. Vol*, 25(4), 174-181.
- Bos, M. A., & van Vliet, T. (2001). Interfacial rheological properties of adsorbed protein layers and surfactants: a review. *Advances in colloid and interface science*, 91(3), 437-471.
- Buckman, J., & Viney, C. (2002). Note. The Effect of a Commercial Extended Egg Albumen on the Microstructure of Icing. *Food science and technology international*, 8(2), 109-115.
- Burgess, D. J. (1993). Drug delivery aspects of biotechnology products *Biotechnology and Pharmacy* (pp. 116-151): Springer.
- Cabezas-Zábala, C. C., Hernández-Torres, B. C., & Vargas-Zárate, M. (2016). Aceites y grasas: efectos en la salud y regulación mundial. *Revista de la Facultad de Medicina*, 64(4), 761-768.

- Calvo, M. (2007). Bioquímica de los alimentos. *Disponible en: <http://milksci.unizar.es/bioquimica/temas/enzimas/tirosinasa.html>* (Verificado: 12 de septiembre de 2011).
- Campbell, G. M., & Mougeot, E. (1999). Creation and characterisation of aerated food products. *Trends in food science & technology*, 10(9), 283-296.
- Carranza-Saavedra, D., Váquiro, H., León-Galván, M., Ozuna, C., & Solanilla, J. (2016). Modelización de la adsorción en la interfase aire-agua de proteína de pescado mediante lógica borrosa. *Agronomía Colombiana*, 34(1Supl), S362-S366.
- Corzo-Martínez, M., Sánchez, C. C., Moreno, F. J., Patino, J. M. R., & Villamiel, M. (2012). Interfacial and foaming properties of bovine  $\beta$ -lactoglobulin: Galactose Maillard conjugates. *Food hydrocolloids*, 27(2), 438-447.
- Cristancho Sosa, J. A. (2017). *Plan de mercadeo de productos alimenticios Santillana, para la comercialización de crema pastelera, Flavor Right en Bogotá*. Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas.
- Choi, Y. H., Lim, S. T., & Yoo, B. (2004). Measurement of dynamic rheology during ageing of gelatine–sugar composites. *International journal of food science & technology*, 39(9), 935-945.
- Dalglish, D. G., & Morris, E. R. (1988). Interactions between carrageenans and casein micelles: electrophoretic and hydrodynamic properties of the particles. *Food Hydrocolloids*, 2(4), 311-320.
- Damodaran, S. (1990). Interfaces, protein films, and foams. *Advances in food and nutrition research*, 34, 1-79.
- De Feijter, J., & Benjamins, J. (1987). Adsorption Kinetics of Proteins at the. *Food emulsions and foams*, 72.
- De Feijter, J., Benjamins, J., & Tamboer, M. (1987). Adsorption displacement of proteins by surfactants in oil-in-water emulsions. *Colloids and Surfaces*, 27(1-3), 243-266.
- de Graaf, C. (2012). Texture and satiation: the role of oro-sensory exposure time. *Physiology & behavior*, 107(4), 496-501.

- Depypere, F., Verbeken, D., Torres, J., & Dewettinck, K. (2009). Rheological properties of dairy desserts prepared in an indirect UHT pilot plant. *Journal of Food Engineering*, 91(1), 140-145.
- Dickinson, E. (1992). Introduction to food colloids.
- Dickinson, E. (1992). An introduction to food colloids, 1992: Oxford University Press, Oxford.
- Dickinson, E. (2001). Milk protein interfacial layers and the relationship to emulsion stability and rheology. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 20(3), 197-210.
- Dickinson, E. (2003). Hydrocolloids at interfaces and the influence on the properties of dispersed systems. *Food Hydrocolloids*, 17(1), 25-39.
- Dickinson, E. (2009). Hydrocolloids as emulsifiers and emulsion stabilizers. *Food hydrocolloids*, 23(6), 1473-1482.
- Dickinson, E., & Hong, S.-T. (1995). Influence of water-soluble nonionic emulsifier on the rheology of heat-set protein-stabilized emulsion gels. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 43(10), 2560-2566.
- Dickinson, E., & McClements, D. J. (1995). *Advances in food colloids*: Springer Science & Business Media.
- Dickinson, E., & Stainsby, G. (1988). *Advances in food emulsions and foams*: Elsevier Applied Science Publishers Ltd.
- Ford, L., Borwankar, R., & Martin Jr, R. (1997). and Holcomb, DN (1997). *Dressings and Sauces, Food Emulsions*. New York: Marcel Dekker, 361-412.
- Goff, H. (1997). Instability and partial coalescence in whippable dairy emulsions. *Journal of Dairy Science*, 80(10), 2620-2630.
- Gorlier, F., Khidas, Y., & Pitois, O. (2017). Coupled elasticity in soft solid foams. *Journal of colloid and interface science*, 501, 103-111.
- Graham, D., & Phillips, M. (1979). Proteins at liquid interfaces: I. Kinetics of adsorption and surface denaturation. *Journal of colloid and interface science*, 70(3), 403-414.
- Gutiérrez Jiménez, L. V. (2015). Determinación de la factibilidad técnica-económica para la producción Nacional de una crema batida para el mercado Food Service.

- Guzey, D., & McClements, D. J. (2006). Formation, stability and properties of multilayer emulsions for application in the food industry. *Advances in colloid and interface science*, 128, 227-248.
- Hasani, F., Pezeshki, A., & Hamishehkar, H. (2015). Effect of surfactant and oil type on size droplets of betacarotene-bearing nanoemulsions. *Int J Curr Microbiol App Sci*, 4, 146.
- Hebishy, E., Buffa, M., Juan, B., Blasco-Moreno, A., & Trujillo, A.-J. (2017). Ultra high-pressure homogenized emulsions stabilized by sodium caseinate: Effects of protein concentration and pressure on emulsions structure and stability. *LWT-Food Science and Technology*, 76, 57-66.
- Hoad, C. L., Rayment, P., Spiller, R. C., Marciani, L., de Celis Alonso, B., Traynor, C., . . . Gowland, P. A. (2004). In vivo imaging of intragastric gelation and its effect on satiety in humans. *The Journal of nutrition*, 134(9), 2293-2300.
- Humblet-Hua, N.-P. K., van der Linden, E., & Sagis, L. M. (2013). Surface rheological properties of liquid–liquid interfaces stabilized by protein fibrillar aggregates and protein–polysaccharide complexes. *Soft Matter*, 9(7), 2154-2165.
- Hunter, T. N., Pugh, R. J., Franks, G. V., & Jameson, G. J. (2008). The role of particles in stabilising foams and emulsions. *Advances in colloid and interface science*, 137(2), 57-81.
- Jimenez-Junca, C. A., Gummy, J. C., Sher, A., & Niranjan, K. (2011). Rheology of milk foams produced by steam injection. *Journal of Food Science*, 76(9).
- Knarr, M., Adden, R., Anderson, W., & Hübner-Keese, B. (2012). Characterization of in-vitro gel performance of novel MC with respect to the suitability for satiety applications. *Food hydrocolloids*, 29(2), 317-325.
- Krog, N., Larsson, K., & Friberg, S. Food Emulsions, 1997, 141: Marcel Dekker, New York.
- Kulmyrzaev, A., Sivestre, M. P., & McClements, D. (2000). Rheology and stability of whey protein stabilized emulsions with high CaCl<sub>2</sub> concentrations. *Food research international*, 33(1), 21-25.

- Labourdenne, S., Gaudry-Rolland, N., Letellier, S., Lin, M., Cagna, A., Esposito, G., . . . Riviere, C. (1994). The oil-drop tensiometer: potential applications for studying the kinetics of (phospho) lipase action. *Chemistry and physics of lipids*, 71(2), 163-173.
- Langevin, D. (2000). Influence of interfacial rheology on foam and emulsion properties. *Advances in colloid and interface science*, 88(1), 209-222.
- Lazarides, H., Fito, P., Chiralt, A., Gekas, V., & Lenart, A. (1999). Advances in osmotic dehydration. *Processing foods: Quality optimisation and process assessment*. Eds. Oliveira ARF and Oliverira JC. CRC Press, London.
- Lazidis, A., Hancocks, R., Spyropoulos, F., Kreuß, M., Berrocal, R., & Norton, I. (2015). Whey protein fluid gels for the stabilisation of foams. *Food hydrocolloids*, 30(1), e9.
- Leser, M., & Michel, M. (1999). Aerated milk protein emulsions—new microstructural aspects. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 4(3), 239-244.
- Li, W., Wang, Y., Zhao, H., He, Z., Zeng, M., Qin, F., & Chen, J. (2016). Improvement of emulsifying properties of soy protein through selective hydrolysis: Interfacial shear rheology of adsorption layer. *Food hydrocolloids*, 60, 453-460.
- Li, W., Zhao, H., He, Z., Zeng, M., Qin, F., & Chen, J. (2016). Modification of soy protein hydrolysates by Maillard reaction: Effects of carbohydrate chain length on structural and interfacial properties. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 138, 70-77.
- MacRitchie, F. (1978). Proteins at interfaces. *Advances in protein chemistry*, 32, 283-326.
- MacRitchie, F., & Fletcher, P. (1990). Chemistry at interfaces: Academic Press, San Diego, CA, 1990 (ISBN 0-12-464785-5). x+ 277 pp. *Analytica Chimica Acta*, 237, 512.
- Mandala, I., Savvas, T., & Kostaropoulos, A. (2004). Xanthan and locust bean gum influence on the rheology and structure of a white model-sauce. *Journal of Food Engineering*, 64(3), 335-342.
- Martínez, K., & Sanchez, C. (2016). Improved Functionality of Foamed WPI Solutions by Ultrasound Application. *J Food Chem Nanotechnol*, 2(2), 79-84.

- Martínez, K. D., & Sanchez, C. C. (2014). New view to obtain dryer food foams with different polysaccharides and soy protein by high ultrasound. *International Journal of Carbohydrate Chemistry*, 2014.
- Martínez, K. D., Sánchez, C. C., Patino, J. M. R., & Pilosof, A. M. (2009). Interfacial and foaming properties of soy protein and their hydrolysates. *Food Hydrocolloids*, 23(8), 2149-2157.
- McClements, D. (1998). Analysis of food emulsions. *Food analysis*, 2nd edn. Aspen Aspen Publishers, Gaithersburg, 571-585.
- Miquelim, J. N., Lannes, S. C., & Mezzenga, R. (2010). pH Influence on the stability of foams with protein–polysaccharide complexes at their interfaces. *Food hydrocolloids*, 24(4), 398-405.
- Mitropoulos, V., Mütze, A., & Fischer, P. (2014). Mechanical properties of protein adsorption layers at the air/water and oil/water interface: A comparison in light of the thermodynamical stability of proteins. *Advances in colloid and interface science*, 206, 195-206.
- Mucci, M., Sánchez, L., Criado, M., & Bianchi, G. (2003). *Desarrollo de fluidos viscoelásticos para la estimulación de pozos*. Paper presented at the Jornadas SAM, Conamet, Simposio Materia.
- Murphy, R. W., Farkas, B. E., & Jones, O. G. (2016). Dynamic and viscoelastic interfacial behavior of  $\beta$ -lactoglobulin microgels of varying sizes at fluid interfaces. *Journal of colloid and interface science*, 466, 12-19.
- Narchi, I., Vial, C., & Djelveh, G. (2009). Effect of protein–polysaccharide mixtures on the continuous manufacturing of foamed food products. *Food hydrocolloids*, 23(1), 188-201.
- Nesaretnam, K., Robertson, N., Basiron, Y., & Macphie, C. (1993). Application of hydrogenated palm kernel oil and palm stearin in whipping cream. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 61(4), 401-407.
- Norn, V. (2014). *Emulsifiers in food technology*: John Wiley & Sons.

- Organization, W. H. (2000). Obesity: preventing and managing the global epidemic: Technical Report of a WHO Expert Consultation on Obesity, 894: 1253. Geneva: WHO.
- Osterholt, K. M., Roe, L. S., & Rolls, B. J. (2007). Incorporation of air into a snack food reduces energy intake. *Appetite*, 48(3), 351-358.
- Oyanedel, J. A. M. (1999). *Principios de estructura de proteínas*: Universidad de Concepción. Facultad de Ciencias Biológicas. Departamento de Biología Molecular.
- Panizzolo, L. A., & Añon, M. C. (2015). Foaming properties of soy protein isolate hydrolysates.
- Perez, A. A. (2012). Espumado de proteínas de suero lácteo en presencia de polisacáridos.
- Pérez, O., Martínez, K., Sánchez, C., & Patino, J. (2017). Strategy for Foaming Improvement of Whey Protein Concentrates by Addition of Hydroxypropylmethylcellulose and Heating: Relation with Interfacial Properties. *Nutr Food Technol Open Access*, 3(2).
- Pérez Rosales, R., Villanueva Rodríguez, S., & Cosío Ramírez, R. (2005). El aceite de aguacate y sus propiedades nutricionales. *e-Gnosis*(3).
- Radulova, G. M., Danov, K. D., Kralchevsky, P. A., Petkov, J. T., & Stoyanov, S. D. (2014). Shear rheology of hydrophobin adsorption layers at oil/water interfaces and data interpretation in terms of a viscoelastic thixotropic model. *Soft Matter*, 10(31), 5777-5786.
- Ratovohery, J. V., Lozano, Y. F., & Gaydou, E. M. (1988). Fruit development effect on fatty acid composition of Persea americana fruit mesocarp. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 36(2), 287-293.
- Rodríguez Patino, J. M., Rodríguez Niño, M. R., & Carrera Sánchez, C. (2007). Physico-chemical properties of surfactant and protein films. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 12(4), 187-195.
- Rosales, R. P., Rodríguez, S. V., & Ramírez, R. C. (2005). El aceite de aguacate y sus propiedades nutricionales. *e-Gnosis*, 3.


- Sánchez, C. C., & Patino, J. M. R. (2005). Interfacial, foaming and emulsifying characteristics of sodium caseinate as influenced by protein concentration in solution. *Food hydrocolloids*, 19(3), 407-416.
- Saulnier, P., Boury, F., Malzert, A., Heurtault, B., Ivanova, T., Cagna, A., . . . Proust, J. (2001). Rheological model for the study of dilational properties of monolayers. Comportment of dipalmitoylphosphatidylcholine (DPPC) at the dichloromethane (DCM)/water interface under ramp type or sinusoidal perturbations. *Langmuir*, 17(26), 8104-8111.
- Schmidt, I., Novales, B., Boué, F., & Axelos, M. A. (2010). Foaming properties of protein/pectin electrostatic complexes and foam structure at nanoscale. *Journal of colloid and interface science*, 345(2), 316-324.
- Spagnuolo, P. A., Dalgleish, D., Goff, H., & Morris, E. (2005). Kappa-carrageenan interactions in systems containing casein micelles and polysaccharide stabilizers. *Food Hydrocolloids*, 19(3), 371-377.
- Tiina, R., Tiina, P., & Kimmo, P. (2012). A comparative study of the fatty acid composition of dairy products and margarines with reduced or substituted fat content. *Food and Nutrition Sciences*, 2012.
- Tirado, D., Acevedo, D., & Torres, R. (2015). Caracterización reológica de una espuma a base de clara de huevo, azúcar y pulpa de tamarindo. *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, 18(2).
- Tornberg, E. (1978). The application of the drop volume technique to measurements of the adsorption of proteins at interfaces. *Journal of Colloid and Interface Science*, 64(3), 391-402.
- Valderrama, J. M. (2006). *Caracterización interfacial de proteínas y tensioactivos: Aplicación a dispersiones alimentarias*. Universidad de Granada.
- Vander Wal, J. S., Marth, J. M., Khosla, P., Jen, K. C., & Dhurandhar, N. V. (2005). Short-term effect of eggs on satiety in overweight and obese subjects. *Journal of the American College of Nutrition*, 24(6), 510-515.
- Vasile, F. E., Martinez, M. J., Ruiz-Henestrosa, V. M. P., Judis, M. A., & Mazzobre, M. F. (2016). Physicochemical, interfacial and emulsifying properties of a non-



- conventional exudate gum (*Prosopis alba*) in comparison with gum arabic. *Food hydrocolloids*, 56, 245-253.
- Vega, C., Dalgleish, D., & Goff, H. (2005). Effect of  $\kappa$ -carrageenan addition to dairy emulsions containing sodium caseinate and locust bean gum. *Food Hydrocolloids*, 19(2), 187-195.
- Ventureira, J. L. (2010). *Propiedades estructurales y funcionales de preparados proteicos de amaranto modificados y soja-amaranto*. Facultad de Ciencias Exactas.
- Vohra, P., & Kratzer, F. H. (1991). *Evaluation of soybean meal determines adequacy of heat treatment*. American Soybean Association.
- Walstra, P. (1993). Principles of emulsion formation. *Chemical Engineering Science*, 48(2), 333-349.
- Walstra, P., & VAN VLIET, T. (2010). Sistemas dispersos: Consideraciones básicas. *DAMODARAN, S. et al. Química de alimentos de fennema. Porto Alegre: Artmed*, 611-660.
- Ward, A., & Tordai, L. (1946). Time-dependence of boundary tensions of solutions I. The role of diffusion in time-effects. *The Journal of Chemical Physics*, 14(7), 453-461.
- Wege, H. A., Holgado-Terriza, J. A., Rosales-Leal, J. I., Osorio, R., Toledano, M., & Cabrerizo-Vílchez, M. Á. (2002). Contact angle hysteresis on dentin surfaces measured with ADSA on drops and bubbles. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 206(1), 469-483.
- Xu, S., & Damodaran, S. (1994). Kinetics of adsorption of proteins at the air-water interface from a binary mixture. *Langmuir*, 10(2), 472-480.
- Yan, F., Zhang, L., Zhao, R.-H., Huang, H.-Y., Dong, L.-F., Zhang, L., . . . Yu, J.-Y. (2012). Surface dilational rheological and foam properties of aromatic side chained N-acyltaurate amphiphiles. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 396, 317-327.
- Zúñiga, R., & Aguilera, J. (2008). Aerated food gels: fabrication and potential applications. *Trends in food science & technology*, 19(4), 176-187.

# **ANEXOS**

## Anexo A. Autorización de repositorio

 Universidad del Tolima	<b>PROCEDIMIENTO DE FORMACIÓN DE USUARIOS</b>  <b>AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL</b>	Página 1 de 3
		Código: GB-P04-F03
		Versión: 03
		Fecha Aprobación: 15 de Febrero de 2017

Los suscritos:

SERGIO ANDRÉS CABRERA NAVARRO _____ _____ _____ _____ _____	con C.C N° con C.C N° con C.C N° con C.C N° con C.C N°	1.110.454.504 _____ _____ _____ _____ _____
--	--	--

Manifiesto (an) la voluntad de:

Autorizar ☒

No Autorizar ☐ Motivo: \_\_\_\_\_


La consulta en físico y la virtualización de **mi OBRA**, con el fin de incluirlo en el repositorio institucional de la Universidad del Tolima. Esta autorización se hace sin ánimo de lucro, con fines académicos y no implica una cesión de derechos patrimoniales de autor.

Manifestamos que se trata de una OBRA original y como de la autoría de LA OBRA y en relación a la misma, declara que la UNIVERSIDAD DEL TOLIMA, se encuentra, en todo caso, libre de todo tipo de responsabilidad, sea civil, administrativa o penal (incluido el reclamo por plagio).

Por su parte la UNIVERSIDAD DEL TOLIMA se compromete a imponer las medidas necesarias que garanticen la conservación y custodia de la obra tanto en espacios físico como virtual, ajustándose para dicho fin a las normas fijadas en el Reglamento de Propiedad Intelectual de la Universidad, en la Ley 23 de 1982 y demás normas concordantes.

La publicación de:

Trabajo de grado	<input checked="" type="checkbox"/>	Artículo	<input type="checkbox"/>	Proyecto de Investigación	<input type="checkbox"/>
Libro	<input type="checkbox"/>	Parte de libro	<input type="checkbox"/>	Documento de conferencia	<input type="checkbox"/>
Patente	<input type="checkbox"/>	Informe técnico	<input type="checkbox"/>		
Otro: (fotografía, mapa, radiografía, película, video, entre otros)					<input type="checkbox"/>

 <b>Universidad del Tolima</b>	<b>PROCEDIMIENTO DE FORMACIÓN DE USUARIOS</b>  <b>AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL</b>	Página 2 de 3
		Código: GB-P04-F03
		Versión: 03
		Fecha Aprobación: 15 de Febrero de 2017

Producto de la actividad académica/científica/cultural en la Universidad del Tolima, para que con fines académicos e investigativos, muestre al mundo la producción intelectual de la Universidad del Tolima. Con todo, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada con arreglo al artículo 30 de la Ley 23 de 1982. En concordancia suscribo este documento en el momento mismo que hago entrega del trabajo final a la Biblioteca Rafael Parga Cortes de la Universidad del Tolima.

De conformidad con lo establecido en la Ley 23 de 1982 en los artículos 30 “**...Derechos Morales. El autor tendrá sobre su obra un derecho perpetuo, inalienable e irrenunciable**” y 37 “**...Es lícita la reproducción por cualquier medio, de una obra literaria o científica, ordenada u obtenida por el interesado en un solo ejemplar para su uso privado y sin fines de lucro**”. El artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, “**los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores**” y en su artículo 61 de la Constitución Política de Colombia.

- Identificación del documento:

Título completo: **Evaluación de mezclas de proteínas con hidrocoloides sobre las propiedades espumantes de emulsiones de aceite de aguacate Persea Americana**

- Trabajo de grado presentado para optar al título de:

**MAGISTER EN CIENCIAS AGROALIMENTARIAS**

- Proyecto de Investigación correspondiente al Programa (No diligenciar si es opción de grado “Trabajo de Grado”):

---

- Informe Técnico correspondiente al Programa (No diligenciar si es opción de grado “Trabajo de Grado”):

---

- Artículo publicado en revista:


---

- Capítulo publicado en libro:

---

- Conferencia a la que se presentó:

---

 <b>Universidad del Tolima</b>	<b>PROCEDIMIENTO DE FORMACIÓN DE USUARIOS</b>  <b>AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL</b>	Página 3 de 3
		Código: GB-P04-F03
		Versión: 03
		Fecha Aprobación: 15 de Febrero de 2017

Quienes a continuación autentican con su firma la autorización para la digitalización e inclusión en el repositorio digital de la Universidad del Tolima, el:

Día: 12 Mes: Abril Año: 2018

Autores: Firma

Nombre:	<u>SERGIO ANDRES CABRERA NAVARRO</u>		C.C.	<u>1.110.454.504</u>
Nombre:	<u></u>	<u></u>	C.C.	<u></u>
Nombre:	<u></u>	<u></u>	C.C.	<u></u>
Nombre:	<u></u>	<u></u>	C.C.	<u></u>

El autor y/o autores certifican que conocen las derivadas jurídicas que se generan en aplicación de los principios del derecho de autor.

**Anexo B.** Análisis de varianza para las emulsiones con diferentes concentraciones de caseinato de sodio.

### **ANOVA Multifactorial - Velocidad de Difusion**

Variable dependiente: Velocidad de Difusion

Factores:

Concentracion Caseinato

Número de casos completos: 24

### **Análisis de Varianza para Velocidad de Difusion - Suma de Cuadrados Tipo III**

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Concentracion Caseinato	37.583	10	3.7583	43.58	0.0000
RESIDUOS	1.121	13	0.0862304		
TOTAL (CORREGIDO)	38.704	23			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Método: 95.0 porcentaje LSD

<i>Concentración Caseinato</i>	<i>Casos</i>	<i>Media LS</i>	<i>Sigma LS</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
Caseinato 3.6%	3	3.5954	0.169539	X
Caseinato 4.6%	2	3.89325	0.207642	XX
Caseinato 5.4%	2	4.21875	0.207642	X
Caseinato 5.6%	2	4.4275	0.207642	X
Caseinato 4.8%	2	5.1039	0.207642	X
Caseinato 4.2%	2	5.55045	0.207642	XX

Caseinato 3.8%	2	5.96855	0.207642	XX
Caseinato 5.2%	2	6.0858	0.207642	XX
Caseinato 5.0%	3	6.35903	0.169539	XX
Caseinato 4.4%	2	6.74005	0.207642	X
Caseinato 4.0%	2	7.68455	0.207642	X

\* indica una diferencia significativa.

Tabla de Medias por Mínimos Cuadrados para Velocidad de Difusion con intervalos de confianza del 95.0%

			<i>Error</i>	<i>Límite</i>	<i>Límite</i>
<i>Nivel</i>	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Est.</i>	<i>Inferior</i>	<i>Superior</i>
MEDIA GLOBAL	24	5.42066			
Concentracion Caseinato					
Caseinato 3.6%	3	3.5954	0.169539	3.22913	3.96167
Caseinato 3.8%	2	5.96855	0.207642	5.51997	6.41713
Caseinato 4.0%	2	7.68455	0.207642	7.23597	8.13313
Caseinato 4.2%	2	5.55045	0.207642	5.10187	5.99903
Caseinato 4.4%	2	6.74005	0.207642	6.29147	7.18863
Caseinato 4.6%	2	3.89325	0.207642	3.44467	4.34183
Caseinato 4.8%	2	5.1039	0.207642	4.65532	5.55248
Caseinato 5.0%	3	6.35903	0.169539	5.99277	6.7253
Caseinato 5.2%	2	6.0858	0.207642	5.63722	6.53438
Caseinato 5.4%	2	4.21875	0.207642	3.77017	4.66733
Caseinato 5.6%	2	4.4275	0.207642	3.97892	4.87608

**Anexo C.** Análisis de varianza para las emulsiones con diferentes concentraciones de albumina.

### **ANOVA Multifactorial - Velocidad de Difusion**

Variable dependiente: Velocidad de Difusion

Factores:

Concentracion Albumina

Número de casos completos: 20

Análisis de Varianza para Velocidad de Difusion - Suma de Cuadrados Tipo III

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Concentracion Albumina	125.351	8	15.6688	36.55	0.0000
RESIDUOS	4.7156	11	0.428691		
TOTAL (CORREGIDO)	130.066	19			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Pruebas de Múltiple Rangos para Velocidad de Difusion por Concentracion Albumina

Método: 95.0 porcentaje LSD

<i>Concentracion Albumina</i>	<i>Casos</i>	<i>Media LS</i>	<i>Sigma LS</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
Albumina 1.2%	3	4.50133	0.378017	X
Albumina 1.0%	2	4.5504	0.462975	X
Albumina 1.8%	2	5.3309	0.462975	XX
Albumina 1.6%	2	5.4805	0.462975	XX



Albumina 2.2%	2	6.4629	0.462975	XX
Albumina 2.4%	2	7.4048	0.462975	XX
Albumina 2.6%	3	7.52767	0.378017	XX
Albumina 2.0%	2	8.6576	0.462975	X
Albumina 1.4%	2	13.2185	0.462975	X

\* indica una diferencia significativa.

Procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Con este método hay un riesgo del 5.0% al decir que cada par de medias es significativamente diferente, cuando la diferencia real es igual a 0.

Tabla de Medias por Mínimos Cuadrados para Velocidad de Difusion con intervalos de confianza del 95.0%

			<i>Error</i>	<i>Límite</i>	<i>Límite</i>
<i>Nivel</i>	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Est.</i>	<i>Inferior</i>	<i>Superior</i>
MEDIA GLOBAL	20	7.01496			
Concentracion Albumina					
Albumina 1.0%	2	4.5504	0.462975	3.5314	5.5694
Albumina 1.2%	3	4.50133	0.378017	3.66932	5.33335
Albumina 1.4%	2	13.2185	0.462975	12.1995	14.2375
Albumina 1.6%	2	5.4805	0.462975	4.4615	6.4995
Albumina 1.8%	2	5.3309	0.462975	4.3119	6.3499
Albumina 2.0%	2	8.6576	0.462975	7.6386	9.6766
Albumina 2.2%	2	6.4629	0.462975	5.4439	7.4819
Albumina 2.4%	2	7.4048	0.462975	6.3858	8.4238
Albumina 2.6%	3	7.52767	0.378017	6.69565	8.35968

**Anexo D.** Análisis de varianza para las emulsiones con diferentes concentraciones de albumina 1.8% con goma arábica 0.4% y albumina 1.8% con goma xantan.

### **ANOVA Multifactorial - Velocidad de Difusión**

Variable dependiente: Velocidad de Difusión

Factores: Adición polisacárido

Número de casos completos: 5

Análisis de Varianza para Velocidad de Difusión - Suma de Cuadrados Tipo III

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Adición polisacárido	34.9294	1	34.9294	48.97	0.0060
RESIDUOS	2.14002	3	0.71334		
TOTAL (CORREGIDO)	37.0694	4			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Pruebas de Múltiple Rangos para Velocidad de Difusión por Adición polisacárido

Método: 95.0 porcentaje LSD

<i>Adición polisacárido</i>	<i>Casos</i>	<i>Media LS</i>	<i>Sigma LS</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
Albumina 1.8%_Arabiga_0.4%	2	20.1775	0.597219	X
Albumina 1.8%_Xantan_0.4%	3	25.5727	0.487627	X

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
------------------	-------------	-------------------	--------------------

Albumina	1.8%_Arabiga_0.4%	-	Albumina	*	-5.39517	2.45369
1.8%_Xantan_0.4%						

\* indica una diferencia significativa.

**Anexo E.** Análisis de varianza para las emulsiones con diferentes concentraciones de caseinato 4.8% con goma arábica 0.4% y caseinato 4.8% con goma xantan.

ANOVA Multifactorial - Velocidad de Difusión

Variable dependiente: Velocidad de Difusión

Factores:

Caseinato\_polisacarido

Número de casos completos: 4

Análisis de Varianza para Velocidad de Difusión - Suma de Cuadrados Tipo III

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Caseinato_polisacarido	0.790943	1	0.790943	4.35	0.1724
RESIDUOS	0.363958	2	0.181979		
TOTAL (CORREGIDO)	1.1549	3			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

Pruebas de Múltiple Rangos para Velocidad de Difusion por Caseinato\_polisacarido

Método: 95.0 porcentaje LSD

<i>Caseinato_polisacarido</i>	<i>Casos</i>	<i>Media LS</i>	<i>Sigma LS</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
Caseinato_4.8%:Arabiga_0.4%	2	1.6052	0.301645	X
Caseinato_4.8%:Xantan_0.4%	2	2.49455	0.301645	X

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
Caseinato_4.8%:Arabiga_0.4% Caseinato_4.8%:Xantan_0.4%	-	-0.88935	1.83547

\* indica una diferencia significativa.

El StatAdvisor

**Anexo F.** Análisis de varianza para las tensiones superficiales de las emulsiones con diferentes concentraciones de Albumina

Tabla ANOVA para Tension Superficial por Albumina

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	411.289	8	51.4111	280424.12	0.0000
Intra grupos	0.00165	9	0.000183333		
Total (Corr.)	411.29	17			

Pruebas de Múltiple Rangos para Tension Superficial por Albumina

Método: 95.0 porcentaje LSD

<i>Albumina</i>	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
2.6	2	36.565	X
2.4	2	39.285	X
2.2	2	40.165	X
2.0	2	41.025	X
1.6	2	41.335	X
1.8	2	41.515	X
1.4	2	45.895	X
1.2	2	50.765	X
1	2	51.055	X

**Anexo G.** Análisis de varianza para las tensiones superficiales de las emulsiones con diferentes concentraciones de Caseinato

Tabla ANOVA para Tensiones superficiales por Caseinato de Sodio

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	307.768	10	30.7768	483635.81	0.0000
Intra grupos	0.0007	11	0.0000636364		
Total (Corr.)	307.769	21			

Pruebas de Múltiple Rangos para Tensiones superficiales por Caseinato de Sodio

Método: 95.0 porcentaje LSD

<i>Nivel</i>	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
5.6	2	36.375	X
5.4	2	38.605	X
5.2	2	38.89	X
4.6	2	44.765	X
4.0	2	45.745	X
4.4	2	45.855	X
4.8	2	45.895	X
3.8	2	46.005	X
5.0	2	46.015	X
4.2	2	46.915	X
3.6	2	47.665	X

**Anexo H.** Análisis de varianza para el módulo elástico  $G'$  y viscoso  $G''$  de las emulsiones con diferentes concentraciones de Albumina

Tabla ANOVA para Elasticidad por Albumina

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	960.758	8	120.095	11160.07	0.0000
Intra grupos	0.09685	9	0.0107611		
Total (Corr.)	960.855	17			

Pruebas de Múltiple Rangos para Elasticidad por Albumina

Método: 95.0 porcentaje LSD

<i>Albumina</i>	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
1.0	2	0.0	X
1.4	2	6.74	X
1.6	2	7.33	X
1.2	2	8.985	X
1.8	2	9.755	X
2.2	2	13.845	X
2.0	2	15.985	X
2.4	2	18.13	X
2.6	2	26.695	X

Tabla ANOVA para Viscosidad por Albumina

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	84.4433	8	10.5554	60.04	0.0000
Intra grupos	1.58235	9	0.175817		



Total (Corr.)	86.0257	17			
---------------	---------	----	--	--	--

Pruebas de Múltiple Rangos para Viscosidad por Albumina

Método: 95.0 porcentaje LSD

<i>Albumina</i>	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
2.2	2	1.445	X
1.8	2	1.455	X
1.4	2	1.685	XX
1.2	2	2.315	XXX
1.6	2	2.48	XX
2.0	2	2.795	XX
2.4	2	2.89	XX
2.6	2	3.645	X
1.0	2	8.875	X

**Anexo I.** Análisis de varianza para el módulo elástico  $G'$  y viscoso  $G''$  de las emulsiones con diferentes concentraciones de Caseinato

Tabla ANOVA para Elasticidad  $G$  por Caseinato de Sodio

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	11.163	10	1.1163	430.85	0.0000
Intra grupos	0.0285	11	0.00259091		
Total (Corr.)	11.1915	21			

Pruebas de Múltiple Rangos para Elasticidad  $G$  por Caseinato de Sodio

Método: 95.0 porcentaje LSD

<i>Nivel</i>	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
4.2	2	0.0	X
4.0	2	0.0	X
3.8	2	0.0	X
3.6	2	0.0	X
4.6	2	0.0	X
4.8	2	0.0	X
4.4	2	0.0	X
5.0	2	0.14	X
5.2	2	0.23	X
5.4	2	0.745	X
5.6	2	2.475	X

Tabla ANOVA para Viscosidad  $G$  por Caseinato de Sodio

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>

Entre grupos	151.356	10	15.1356	4352.72	0.0000
Intra grupos	0.03825	11	0.00347727		
Total (Corr.)	151.394	21			

### Pruebas de Múltiple Rangos para Viscosidad G por Caseinato de Sodio

Método: 95.0 porcentaje LSD

<i>Nivel</i>	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
5.6	2	0.46	X
5.4	2	0.875	X
5.2	2	0.985	X
5.0	2	1.405	X
4.6	2	1.585	X
4.8	2	1.61	X
4.4	2	1.62	X
4.2	2	1.75	X
4.0	2	2.915	X
3.8	2	5.22	X
3.6	2	9.91	X

**Anexo J.** Análisis de varianza para la estabilidad de espuma de las emulsiones con diferentes concentraciones de Albumina.

Tabla ANOVA para Estabilidad Espuma por Albumina

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>de Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	2.23963E9	8	2.79954E8	154684.80	0.0000
Intra grupos	16288.5	9	1809.83		
Total (Corr.)	2.23965E9	17			

Pruebas de Múltiple Rangos para Estabilidad Espuma por Albumina

Método: 95.0 porcentaje LSD

<i>Albumina</i>	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
1.0	2	1307.05	X
1.4	2	7399.31	X
1.6	2	7499.85	X
1.2	2	10901.8	X
1.8	2	17767.0	X
2.0	2	21475.9	X
2.2	2	26282.6	X
2.4	2	30722.3	X
2.6	2	36063.7	X

**Anexo K.** Análisis de varianza para la estabilidad de espuma de las emulsiones con diferentes concentraciones de Caseinato de Sodio.

Tabla ANOVA para Estabilidad de Espuma por Caseinato de Sodio

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	565738.	10	56573.8	28462.77	0.0000
Intra grupos	21.864	11	1.98764		
Total (Corr.)	565760.	21			

Pruebas de Múltiple Rangos para Estabilidad de Espuma por Caseinato de Sodio

Método: 95.0 porcentaje LSD

<i>Nivel</i>	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
3.6	2	226.615	X
4.0	2	267.07	X
3.8	2	289.105	X
4.4	2	322.61	X
4.6	2	339.06	X
5.0	2	351.13	X
4.2	2	384.575	X
4.8	2	399.795	X
5.2	2	414.815	X
5.4	2	619.63	X
5.6	2	802.59	X

**Anexo L.** Análisis de varianza para la formación de espuma de las emulsiones con diferentes concentraciones de Albumina

Tabla ANOVA para Formación de Espuma por Albumina

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	687.558	8	85.9448	1158.81	0.0000
Intra grupos	0.6675	9	0.0741667		
Total (Corr.)	688.226	17			

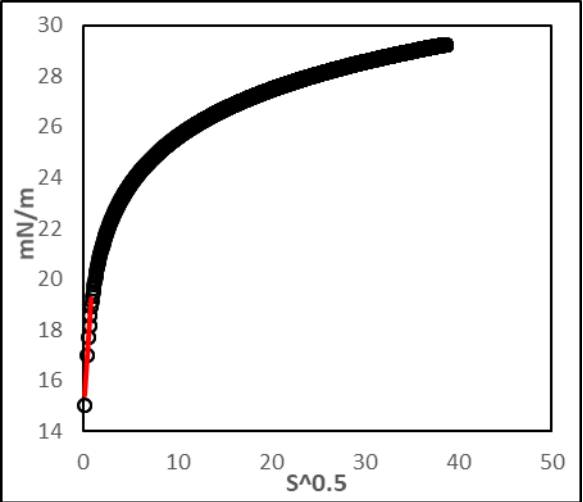
**Anexo M.** Análisis de varianza para la formación de espuma de las emulsiones con diferentes concentraciones de Caseinato de Sodio.

Tabla ANOVA para Formación de Espuma por Caseinato de Sodio

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	16134.8	10	1613.48	7193.25	0.0000
Intra grupos	2.46735	11	0.224305		
Total (Corr.)	16137.3	21			

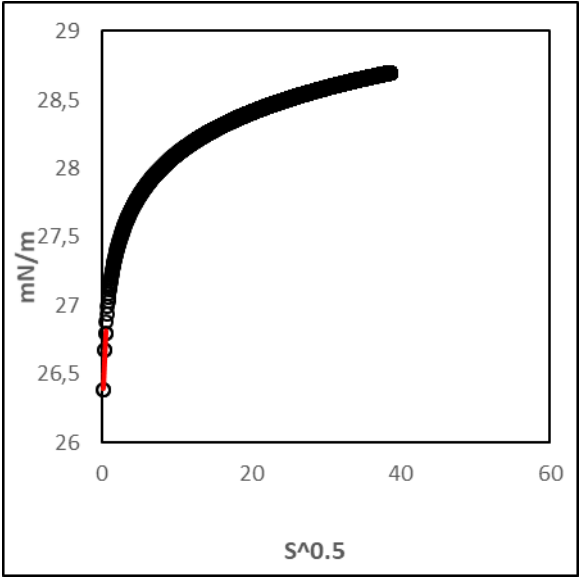
## Anexo N. Tablas velocidades de difusión.

**Tabla 11.** Velocidad de difusión del Caseinato de Sodio en emulsiones de aceite de aguacate.

[ ] (% p/v)	K <sub>1</sub> Difusión (mN/m*s <sup>0.5</sup> )	Grafico velocidad de Difusión hacia la interface.
Caseinato de sodio 3.6%	3.60 <sup>a</sup> + 0.60	
Caseinato de sodio 3.8%	5.97 <sup>de</sup> + 0.01	
Caseinato de sodio 4.0%	7.68 <sup>g</sup> + 0.58	
[ ] (% p/v)	K <sub>1</sub> Difusión (mN/m*s <sup>0.5</sup> )	Grafico velocidad de Difusión hacia la interface.
Caseinato de sodio 4.2%	5.55 <sup>cd</sup> + 0.45	
Caseinato de sodio 4.4%	6.74 <sup>f</sup> + 0.09	



Caseinato de sodio 4.6%  $3.89^{ab} + 0.37$



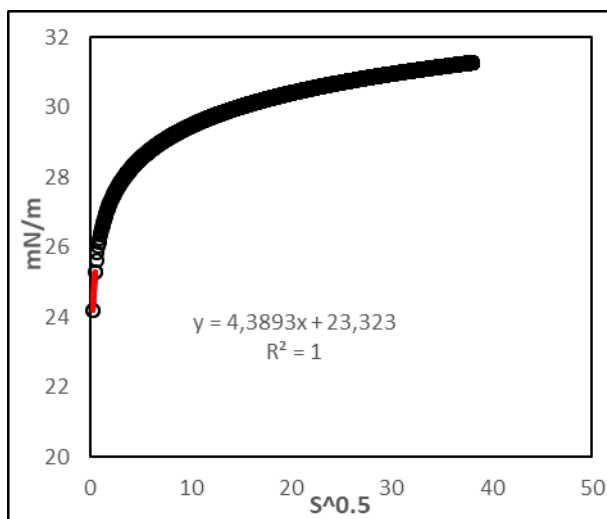
[ ] (% p/v)	K <sub>1</sub> Difusión (mN/m*s <sup>0.5</sup> )	Grafico velocidad de Difusión hacia la interface.
Caseinato de sodio 4.8%	$5.10^c + 0.21$	<p>A graph showing the relationship between surface tension (mN/m) on the y-axis and <math>S^{0.5}</math> on the x-axis for Caseinato de sodio 4.8%. The y-axis ranges from 15 to 29 with increments of 2. The x-axis ranges from 0 to 20 with increments of 5. Data points (open circles) show a decrease in surface tension from approximately 20.5 mN/m at <math>S^{0.5} = 0</math> to about 22.5 mN/m at <math>S^{0.5} = 1</math>, followed by a gradual increase to approximately 28.5 mN/m at <math>S^{0.5} = 15</math>. A linear regression line is fitted to the data points with the equation <math>y = 6,1752x + 19,031</math> and <math>R^2 = 1</math>.</p>
Caseinato de sodio 5.0%	$6.20^{ef} + 0.03$	
Caseinato de sodio 5.2%	$6.09^{de} + 0.07$	
Caseinato de sodio 5.4%	$4.22^b + 0.33$	
Caseinato de sodio 5.6%	$4.40^b + 0.20$	

[ ] (% p/v)	K <sub>1</sub> Difusión (mN/m*s <sup>0.5</sup> )	Grafico velocidad de Difusión hacia la interface.
-------------	---	--

Albumina 1.0%      4.55<sup>a</sup>+ 0.23

Albumina 1.2%      4.66<sup>a</sup>+ 0.40

Albumina 1.4%      13.22<sup>e</sup>+ 0.57

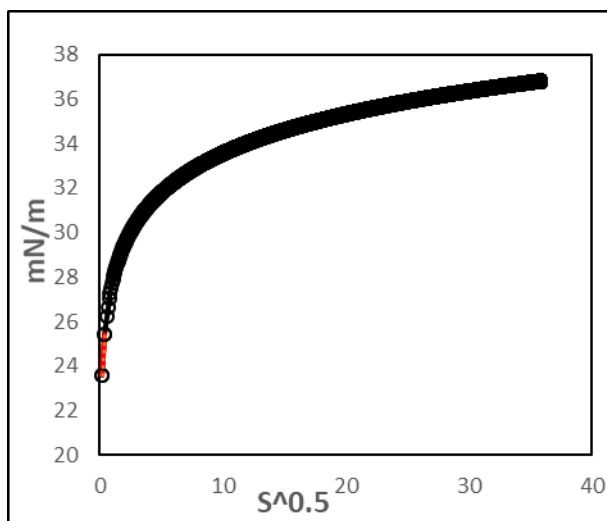


[ ] (% p/v)	K <sub>1</sub> Difusión (mN/m*s <sup>0.5</sup> )	Grafico velocidad de Difusión hacia la interface.
-------------	---	--

Albumina 1.6%      5.48<sup>ab</sup>+ 0.37

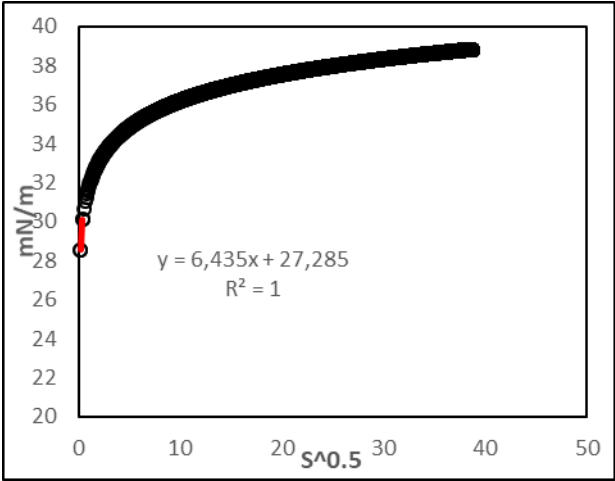
Albumina 1.8%      5.33<sup>ab</sup>+ 0.26

Albumina 2.0%      8.65<sup>d</sup>+ 1.50



[ ] (% p/v)	K <sub>1</sub> Difusión (mN/m*s <sup>0.5</sup> )	Grafico velocidad de Difusión hacia la interface.
-------------	--	---

Albumina 2.2%      6.46<sup>bc</sup>+ 0.04



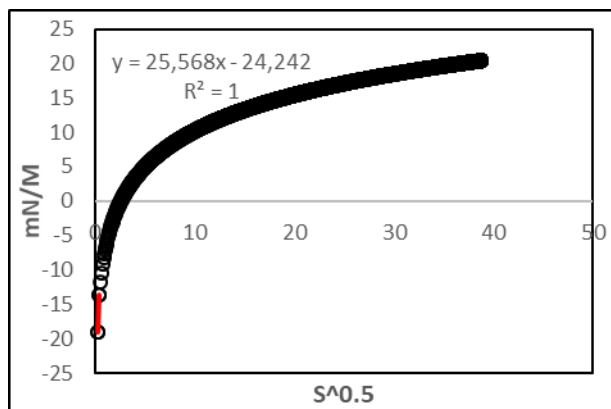
Albumina 2.4%      7.40<sup>cd</sup>+ 0.48

Albumina 2.6%      7.64<sup>cd</sup>+ 0.14

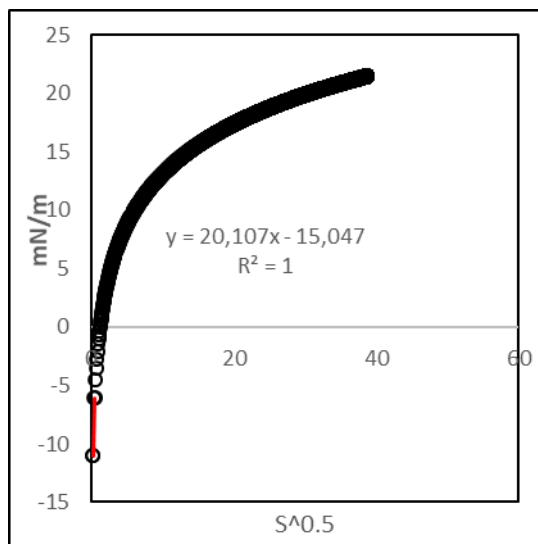
[ ] (% p/v)	K <sub>1</sub> Difusión (mN/m*s <sup>0.5</sup> )	Grafico velocidad de Difusión hacia la interface.
-------------	--	---

Albumina  
1.8%\_Goma\_  
Xantan 0.4%

$$26.09^b + 0.73$$



Albumina  
1.8%\_Goma\_  
Xantan 0.4%



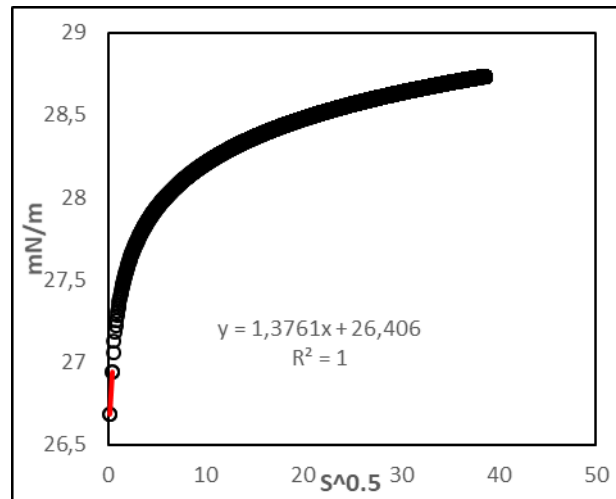
[ ] (% , p/v)

$K_1$  Difusión  
(mN/m\*s<sup>0.5</sup>)

Grafico velocidad de Difusión hacia la  
interface.


Caseinato de  
Sodio1.8%\_Gom  
a\_ Arábica 0.4%

$$1.61^a + 0.32$$



Caseinato de  
Sodio1.8%\_Gom  
a\_ Xantan 0.4%

$$2.49^a + 0.51$$

 <b>Universidad del Tolima</b>	<b>PROCEDIMIENTO DE FORMACIÓN DE USUARIOS</b>  <b>AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL</b>	Página 1 de 3
		Código: GB-P04-F03
		Versión: 03
		Fecha Aprobación: 15 de Febrero de 2017

Los suscritos:

_____ SERGIO ANDRÉS CABRERA NAVARRO	con C.C N°	_____ 1.110.454.504
_____	con C.C N°	_____
_____	con C.C N°	_____
_____	con C.C N°	_____
_____	con C.C N°	_____

Manifiesto (an) la voluntad de:

Autorizar ☒

No Autorizar ☐ Motivo: \_\_\_\_\_


La consulta en físico y la virtualización de **mi OBRA**, con el fin de incluirlo en el repositorio institucional de la Universidad del Tolima. Esta autorización se hace sin ánimo de lucro, con fines académicos y no implica una cesión de derechos patrimoniales de autor.

Manifestamos que se trata de una OBRA original y como de la autoría de LA OBRA y en relación a la misma, declara que la UNIVERSIDAD DEL TOLIMA, se encuentra, en todo caso, libre de todo tipo de responsabilidad, sea civil, administrativa o penal (incluido el reclamo por plagio).

Por su parte la UNIVERSIDAD DEL TOLIMA se compromete a imponer las medidas necesarias que garanticen la conservación y custodia de la obra tanto en espacios físico como virtual, ajustándose para dicho fin a las normas fijadas en el Reglamento de Propiedad Intelectual de la Universidad, en la Ley 23 de 1982 y demás normas concordantes.

La publicación de:

Trabajo de grado	<input checked="" type="checkbox"/>	Artículo	<input type="checkbox"/>	Proyecto de Investigación	<input type="checkbox"/>
Libro	<input type="checkbox"/>	Parte de libro	<input type="checkbox"/>	Documento de conferencia	<input type="checkbox"/>
Patente	<input type="checkbox"/>	Informe técnico	<input type="checkbox"/>		
Otro: (fotografía, mapa, radiografía, película, video, entre otros)					<input type="checkbox"/>

 <b>Universidad del Tolima</b>	<b>PROCEDIMIENTO DE FORMACIÓN DE USUARIOS</b>  <b>AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL</b>	Página 2 de 3
		Código: GB-P04-F03
		Versión: 03
		Fecha Aprobación: 15 de Febrero de 2017

Producto de la actividad académica/científica/cultural en la Universidad del Tolima, para que con fines académicos e investigativos, muestre al mundo la producción intelectual de la Universidad del Tolima. Con todo, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada con arreglo al artículo 30 de la Ley 23 de 1982. En concordancia suscribo este documento en el momento mismo que hago entrega del trabajo final a la Biblioteca Rafael Parga Cortes de la Universidad del Tolima.

De conformidad con lo establecido en la Ley 23 de 1982 en los artículos 30 “**...Derechos Morales. El autor tendrá sobre su obra un derecho perpetuo, inalienable e irrenunciable**” y 37 “**...Es lícita la reproducción por cualquier medio, de una obra literaria o científica, ordenada u obtenida por el interesado en un solo ejemplar para su uso privado y sin fines de lucro**”. El artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, “**los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores**” y en su artículo 61 de la Constitución Política de Colombia.

- Identificación del documento:

Título completo: **Evaluación de mezclas de proteínas con hidrocoloides sobre las propiedades espumantes de emulsiones de aceite de aguacate Persea Americana**

- Trabajo de grado presentado para optar al título de:

**MAGISTER EN CIENCIAS AGROALIMENTARIAS**

- Proyecto de Investigación correspondiente al Programa (No diligenciar si es opción de grado “Trabajo de Grado”):

---

- Informe Técnico correspondiente al Programa (No diligenciar si es opción de grado “Trabajo de Grado”):

---

- Artículo publicado en revista:

---

- Capítulo publicado en libro:

---

- Conferencia a la que se presentó:

---

